

УДК 551.576.1:614.842

*В.Н. Козлов**, *А.П. Доронин***, *В.М. Петроченко***

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ И МЕТОДЫ ЕЕ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ

* Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова; ** Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, doronin52@mail.ru

V.N. Kozlov, A.P. Doronin, V.M. Petrochenko

ECOLOGICAL DANGER FROM FOREST FIRES AND METHODS OF THEIR PREVENTION

В статье рассматриваются вопросы, связанные с разработкой методов искусственного вызывания осадков из конвективных облаков и создания искусственной перистой облачности. Сделан вывод о целесообразности использования предлагаемых методов в целях тушения лесных пожаров и профилактики их возникновения.

Ключевые слова: конвективные облака, лесной пожар, искусственные осадки, искусственное вызывание осадков.

To reduce ecological danger from forest fires the questions connected with the development methods of artificial rainmaking from convective clouds and creation of artificial cirrus cloud are given. Conclusion about using of proposed methods to put up the forest fires and to except them formation is made.

Keywords: convective clouds, forest fire, artificial rainfall, artificial rainmaking.

Введение

Лесные пожары являются одной из трудно решаемых проблем народного хозяйства. По статистическим данным лесные пожары уничтожают в год до 70 млн м³ древесины и до 700 тыс. га лесных насаждений. Основными причинами возникновения лесных пожаров являются: а) засуха и нарушение правил пожарной безопасности в лесу и на прилегающих территориях; б) самовозгорание лесной подстилки в результате преломления солнечных лучей в осколках стекла или самовозгорание торфа под действием микроорганизмов в присутствии кислорода при влажности торфа ниже 40 %; в) грозовые разряды над лесными территориями при прохождении фронтальных разделов и другие причины.

Помимо экономического ущерба, пожары оказывают влияние на региональную погоду и климат: при действии крупных пожаров или многих небольших

пожаров в регионах формируются устойчивые области высокого давления, сопоставимые по масштабам с атмосферными барическими системами. Циклоны обходят эти участки стороной, формируя в местах пожаров еще более сухую и жаркую погоду. Потепление климата на планете сопровождается возникновением и значительной продолжительностью лесных пожаров в северных регионах планеты, что приводит к дополнительным выбросам CO_2 , черного углерода (сажи), оксида азота, воздействие которого на атмосферу значительнее CO_2 , и других вредных примесей и, соответственно, к ускорению климатических изменений. В статье рассматриваются экологические последствия лесных пожаров и методы их тушения и предотвращения.

Лесные пожары на всей планете являются стихийным бедствием, наносящим существенный ущерб народному хозяйству. Крупные лесные пожары возникают 1–3 раза в десятилетие. Особенно многочисленными они были в XX столетии: в 1901, 1908, 1910, 1912, 1915, 1921, 1932, 1934, 1936, 1938, 1955, 1958, 1966, 1972, 1975, 1976, 1984 гг. [2]. Катастрофические лесные пожары с десятками крупных очагов наблюдаются гораздо реже. Особенно высокая горимость лесов наблюдалась в 1915, 1921, 1972, 1976, 2010 гг.

Предотвращение лесных пожаров является приоритетным направлением лесосохраны, так как снижается риск возникновения и минимизируются затраты на тушение лесных пожаров. Не вызывает сомнения то, что пожар легче предотвратить, нежели потушить. Мониторинг лесных территорий включает в себя определение класса пожароопасности (КПО) лесов, проведение профилактических работ наземными службами, снижение КПО лесов искусственно вызванными осадками (ИВО) и другие мероприятия [1, 3, 8, 9, 11].

Существующие методики оценки лесопожарной обстановки [3] позволяют определить площадь и периметр зоны возможных пожаров в регионе (области, районе). Исходными данными являются значения лесопожарного коэффициента и время развития пожара. Значение лесопожарного коэффициента зависит от природных и погодных условий региона и времени года. Решение лесопожарной проблемы тесно связано с решением целого ряда организационных и технических задач. В первую очередь это проведение противопожарных и профилактических работ, осуществляемых в плановом порядке и направленных на предупреждение возникновения, распространения и развития лесных пожаров, в том числе ИВО [1, 8, 9, 11].

Синоптические процессы, благоприятствующие возникновению пожаров

В России изучение влияния атмосферных процессов на возникновение лесных пожаров было начато Г.Я. Вангенгеймом, который предложил прогнозировать возникновение и развитие лесных пожаров по пяти типам погодных условий и ввел 17-балльную шкалу для оценки пожарной опасности погоды для леса. Более поздние исследования подтвердили тесную связь пожарной опасности в лесу с антициклоническим характером погоды [2]. Наиболее значимые пожароопасные ситуации возникают при прохождении холодных фронтов, вызывающих сильные ветры. Усиление пожарной опасности лесов связано с нисходящими движениями воздуха на большой площади (антициклональный характер погоды), сопровождающимися быстрым повышением температуры и уменьшением относительной

влажности. Не менее сложная пожароопасная обстановка создается в теплых секторах циклонов, сменяющих антициклоны.

В непродолжительный период смены барических образований пожары развиваются и распространяются значительно быстро. Этому способствуют смена термической стратификации атмосферы с устойчивой на неустойчивую, развитие конвекции в атмосфере, увеличение высоты подъема конвективной колонки, усиление ветра в основании конвективной колонки и, как следствие, интенсивности пожара. Площадь пожаров при таких синоптических ситуациях за 2–3 дня может увеличиваться в десятки раз, а пожары становятся стихийным бедствием.

В Сибири и на Дальнем Востоке большинство лесных пожаров возникает в малоградиентных барических полях, в которых не наблюдаются сильные ветры, но характерны высокие температуры и низкая относительная влажность для пониженного давления, а для повышенного давления – прохождение холодных фронтальных разделов с грозами, сопровождающимися порывистыми ветрами и незначительными осадками.

Синоптические положения, при которых создается наивысшая пожарная опасность и наблюдаются лесные пожары, развивающиеся до крупных размеров, можно подразделить на четыре типа:

- обширный антициклон с прохождением по его периферии теплого фронта;
- глубокий циклон с фронтом окклюзии в теплом секторе;
- прохождение теплых фронтов при малоградиентных барических полях пониженного давления;
- прохождение холодных фронтов при малоградиентных полях повышенного давления.

Предвестниками крупных пожаров считаются некоторые типичные черты погоды, предшествующие пожароопасному периоду: сухая осень предшествующего года, малоснежная и холодная зима, ранняя и холодная весна [2, 9].

Сведения о лесных пожарах указывают на то, что грозы являются одной из причин возникновения лесных пожаров. Географическое распределение гроз над сушей определяется характером температурно-влажностного режима, циркуляцией атмосферы и рельефом местности.

Анализ повторяемости числа дней с грозами показал, что существуют очаги повышенной грозовой активности и зоны малого числа дней с грозой [9].

Для принятия решения по ИВО анализируют синоптическое положение, данные температурно-влажностного радиозондирования, распределение ветра по высотам, наличие положительной энергии неустойчивости в атмосфере, уровень конденсации (вероятную нижнюю границу облаков) и уровень свободной конвекции (вероятную верхнюю границу облаков), а также знакомятся с прогнозом развития конвективной облачности. При отсутствии этих данных по картам барической топографии (АТ850, АТ700 и АТ500) в районе работ определяют скорость перемещения облаков (как правило, она равна 0,8 скорости ветра на АТ700) [8, 11].

К районам проведения работ по ИВО относятся территории лесного фонда, на которых своевременная ликвидация лесных пожаров не может быть обеспечена существующими наземными силами и средствами пожаротушения [8, 11]. ИВО в профилактических целях при отсутствии лесных пожаров проводят для

снижения класса пожарной опасности, когда расчетная мощность облаков по прогнозу оказывается более 2–2,5 км.

Наиболее благоприятные условия для проведения работ по ИВО отмечаются, когда нижние слои воздуха имеют значительную влажность (более 60 %), ветры слабые или полностью отсутствуют, местами были дожди конвективного происхождения, над районом работ по высотам наблюдаются градиенты температуры больше влажноадиабатических. ИВО над районом работ для тушения очагов лесных пожаров целесообразно проводить в следующих синоптических ситуациях: область пониженного давления (малоградиентное барическое поле), приближение фронтальных разделов, ложбина, слабовыраженные фронтальные разделы типа вторичных холодных фронтов или фронтов окклюзий [11]. ИВО проводить нецелесообразно, если в районе работ наблюдается усиливающийся антициклон (давление у земли растет), энергия неустойчивости отрицательная, на высотах наблюдается конвергенция ветра, градиенты температуры в нижней тропосфере меньше влажноадиабатических [8, 11].

В горимости лесов России грозы играют немаловажную роль. По многолетним данным «Авиалесоохраны» количество лесных пожаров от гроз колеблется от 6 до 20 % от всех лесных пожаров. В отдельные годы в лесах Западной Сибири от молний возникало 70–80 %, а в лесах севера европейской части России – до 40–60 % всех пожаров. Наиболее часто пожары от гроз возникают на территориях Томской и Тюменской областей, Алтайского края, в Приангарье и Забайкалье, Якутии и других регионах Дальнего Востока [6]. Особенностью лесных пожаров, возникших от гроз, является одновременное их возникновение во многих местах. Синхронность указанных явлений обычно прослеживается в период засух, когда устанавливается высокая пожарная опасность с КПО 3–5 классов. Выпадающие при грозах осадки неравномерны по площади и незначительны по величине, и в большинстве случаев они не снижают степень пожарной опасности в лесу.

Грозы наблюдаются в основном при 3 классе КПО. Анализ возникновения лесных пожаров от гроз показывает, что их возникновение связано с прохождением вблизи очагов пожаров холодных фронтов при значительном прогреве приземного слоя воздуха и наличии холодного воздуха на высотах. Следует подчеркнуть, что возникновение лесных пожаров чаще всего наблюдается при сухих грозах. Этому, как правило, предшествует сухая погода, наблюдаемая при высоких метеорологических комплексах, определяющих КПО. Термодинамические условия для развития конвекции сохраняются, а израсходованные влагозапасы воздушной массы не восполняются в количестве, достаточном для образования осадков.

Экологический и социальный ущерб от лесных пожаров

Опасность лесных пожаров для людей связана не только с прямым действием огня, но и с большой вероятностью отравления из-за сильного обескислороживания атмосферного воздуха, резкого повышения концентрации угарного газа, окиси углерода и других вредных примесей. По данным многолетней статистики, 90 % пожаров вызвано антропогенными факторами при возникновении засушливых явлений. Так, засуха 2010 г. послужила причиной возникновения наиболее крупных лесных пожаров в истории России. В европейской части страны с середины июня

2010 г. более двух месяцев стояла аномальная жара и засуха, создавшая благоприятные условия для развития лесных пожаров. Всего с начала пожароопасного периода 2010 г. в России произошло более 29 тыс. природных пожаров на общей площади 927,5 тыс. га. В пожарах погибли более 50 человек, сгорели 2,5 тыс. домов. По данным Всемирного центра мониторинга пожаров, площадь, пройденная пожарами на природных территориях России с начала 2010 г. по 13 августа, составила не менее 10–12 млн га [13]. Пожары затронули не менее 60 федеральных заповедников и национальных парков, уничтожив реликтовые леса и другие эталонные экосистемы, был нанесен непоправимый урон популяциям редких видов растений и животных.

По данным Рослесозащиты, с середины июня до начала августа 2010 г. были зарегистрированы лесные пожары на площади 3900 га земель, загрязненных радионуклидами, в т. ч. в Брянской (33 пожара на площади 269 га), Калужской (11 пожаров на площади 173 га), Тульской (6 пожаров на площади 44 га), Орловской (3 пожара на площади 13 га), Пензенской (34 пожара на площади 82 га), Челябинской (401 пожар на площади 1431 га) и Курганской (12 пожаров на площади 63 га) областях [13]. В результате лесных и торфяных пожаров в России в 2010 г., по оценке геобиоцентра Мюнхенского университета (Германия), в атмосферу планеты было выброшено от 30 до 100 млн т двуокиси углерода [13]. Эмиссия CO₂ от лесных пожаров будет наблюдаться и в последующие годы за счет разложения поврежденной огнем, но не сгоревшей биомассы. По экспертным оценкам, общий выброс углекислоты от пожаров 2010 г. может составить 400 млн т (эквивалентно 18 % годовых антропогенных выбросов парниковых газов в России). Трудно определить стоимость основных экосистемных услуг, которые предоставляли сгоревшие леса (поглощение двуокиси углерода, выделение кислорода, защита почв и водоемов и др. [13]). В результате пожаров также ухудшается санитарное состояние выживших древостоев, увеличивается глубина промерзания почвы (в связи с ликвидацией лесной подстилки), усиливается поверхностный сток и водная эрозия на больших территориях, повышается вероятность наводнений при выпадении обильных осадков и быстром снеготаянии.

Интенсивное задымление при пожарах 2010 г. (иногда видимость не превышала 30–50 м) затронуло все регионы Центрального федерального округа. Как известно, вещества, содержащиеся в дыме от торфяно-лесных пожаров, наносят ущерб здоровью населения. Так, по данным Минздравсоцразвития [13], в июле 2010 г. число смертей по России в годовом исчислении выросло на 8,6 % (в январе–июне смертность сокращалась). В некоторых из охваченных пожарами и/или задымлениями регионах смертность в июле 2010 г. (по сравнению с июлем 2009 г.) существенно возросла: в Москве – на 50,7 %; в Ивановской обл. – на 18,3 %; в Московской и Тульской обл. – на 17,3 %; в Республике Татарстан – на 16,6 %; в Рязанской обл. – на 13,5 %; в Ульяновской обл. – на 13 %; в Тамбовской обл. – на 11,1 %; в Липецкой обл. – на 9 %; в Республике Мордовия – на 6,8 %. При этом в целом за период с января по июль 2010 г. смертность в России снизилась на 0,3 %. В ряде областей, где наблюдалась высокая температура, но отсутствовало интенсивное задымление, смертность в июле снижалась или увеличивалась незначительно (в Белгородской обл. – рост на 2,6 %, в Кировской обл. – рост на 1,1 %, в Воронежской обл. – рост на 0,7 %, в Волгоградской обл. – снижение на 4,4 %, в Ставропольском

крае – снижение на 3,6 %). Это говорит о том, что увеличение смертности населения летом 2010 г. было связано с пагубным воздействием задымления от многочисленных лесных пожаров.

По данным департамента здравоохранения правительства Москвы, на 9 августа 2010 г. дополнительная ежедневная смертность от аномально высокой температуры и задымления в Москве достигала 320–340 человек. Вызовы скорой помощи и число обращений к врачам увеличились на 20 %. Общее число госпитализаций увеличилось на 10 %, госпитализаций детей — на 17 %. Основные причины обращений – сердечно-сосудистые патологии, бронхиальная астма, гипертоническая болезнь, проблемы с легкими. В больницах были запрещены плановые хирургические операции. Подобная картина наблюдалась и в других областях, подвергшихся негативному воздействию лесных пожаров. Например, в г. Тольятти (Самарская обл.) в дни сильного задымления число вызовов скорой помощи в среднем увеличивалось в 1,5 раза (от 600–650 до 1060 в сутки) [13].

Наиболее подробные данные по влиянию длительного задымления от лесных пожаров на здоровье населения представлены по Хабаровскому краю [13]. Так, после четырех месяцев задымления в 1998 г. в течение двух лет наблюдался устойчивый рост заболеваемости в Комсомольске-на-Амуре по многим классам болезней. Возвращение к допожарному уровню произошло лишь через четыре года.

Основные факторы, определяющие формирование ресурсной облачности для искусственного вызывания осадков

Искусственно вызванные осадки являются основным средством тушения лесных пожаров в таежной зоне и труднодоступной горной местности. В связи с тем, что необходимая для этих целей ресурсная облачность не всегда наблюдается при пожарах, основное значение приобретают профилактические работы по снижению класса пожарной опасности лесов.

Пространственное распределение облачности, ее вертикальная протяженность, суточный и сезонный ход, а также другие характеристики обуславливаются взаимодействием ряда факторов, основными из которых являются характер циркуляционных процессов и свойства подстилающей поверхности. В результате циркуляционных процессов формируются воздушные потоки, переносящие водяной пар на большие расстояния по горизонтали, и крупномасштабные вертикальные движения, приводящие к вертикальному подъему влаги во всей толще тропосферы. Следствием этих процессов являются процессы облакообразования и осадкообразования, обеспечивающие влагооборот воды в системе «Земля – атмосфера».

На территории Российской Федерации по преобладающему горизонтальному переносу воздушных масс выделяют три крупные климатические области: атлантическую, арктическую, тихоокеанскую. Последние, в свою очередь, подразделяются на более мелкие климатические районы и подрайоны, которые существенно различаются по режиму облачности и осадков.

Область атлантического переноса распространяется на европейскую часть России и Западную Сибирь. Европейская часть Российской Федерации относится к атлантико-континентальным и континентальным районам. Летом в этих районах на фронтах развивается циклоническая деятельность, которая обуславливает

развитие облаков и частое выпадение осадков. В эти районы проникает и тропический воздух, влага которого служит существенным дополнением к осадкам атлантических циклонов. Однако это влияние не распространяется на юго-восточные районы европейской части Российской Федерации, для которых характерны засухи и суховеи.

На территории Западной Сибири также можно выделить несколько районов с различным режимом облачности и осадков, но, в отличие от европейской части, климатические изменения с запада на восток в этой области происходят медленнее. Последнее обусловлено тем, что Западная Сибирь находится под влиянием не только Атлантики, но и обширного Азиатского континента. Область арктического переноса распространяется на территорию Восточной Сибири. Для нее характерны вторжения арктических воздушных масс, которые затем трансформируются и приобретают свойства континентальной воздушной массы. Сюда не проникает ни атлантический, ни тихоокеанский воздух.

Область тихоокеанского переноса распространяется на территорию Дальнего Востока. Однако циркуляционные процессы, развивающиеся над Тихим океаном, не имеют тенденции к продвижению на запад, в глубь континента, так как этому препятствуют горы. Поэтому на Дальнем Востоке основная роль в формировании климата и, следовательно, режима облачности и осадков принадлежит циркуляционным процессам. Сезонная смена океанических масс обуславливает сухую зиму и дождливое лето.

Наряду с общей циркуляцией, весьма важным климатическим фактором является рельеф. Хотя он и относится к факторам местного значения, однако нередко играет решающую роль в формировании пространственно-временного распределения облаков. Масштабы воздействия рельефа на климат зависят от высоты и протяженности горной системы. Все горные хребты обостряют циклоническую деятельность и увеличивают облачность. Различия в формах рельефа обуславливают более сложное и разнообразное распределение всех метеорологических величин. Так, над возвышенностями повторяемость конвективной облачности больше, чем над долинами и котловинами. Имеются различия в суточном и годовом ходе облаков для станций, расположенных в долинах и предгорьях. Наличие окраинных морей и крупных водоемов в теплый период приводит к ослаблению конвекции и, следовательно, к уменьшению повторяемости конвективных облаков.

Области существенно различаются не только по характеру циркуляционных процессов, но и по свойствам подстилающей поверхности. Так, основную часть территории Западной Сибири занимает Западно-Сибирская равнина, и только с юго-востока она окаймлена горами. Восточная Сибирь представляет собой горную страну. Территория Дальнего Востока также может быть охарактеризована как горная страна, на которой равнины располагаются только в межгорных впадинах, вдоль морских побережий и долин крупных рек.

Возникновение лесных пожаров происходит весной после схода снежного покрова. В Сибири и на Дальнем Востоке различают два типа пожароопасных сезонов: продолжительный непрерывный, когда горимость сохраняется 5–7 месяцев, и короткий непрерывный с максимумом в летние месяцы. Первый сезон характерен для южной тайги, второй – для средней и северной тайги. Одним из

показателей возникновения крупных лесных пожаров (для Сибири площадь пожара 200 га и более, для европейской части Российской Федерации – 25 га и более) считают число дней без осадков по сезонам: весна, лето, осень.

В весенний пожароопасный период крупные пожары возникают при 10–20-дневном засушливом периоде, в летний период – при 20–30-дневной засухе, в осенний период – при 20–40-дневном отсутствии осадков. Максимум крупных пожаров возникает весной после 30–40-дневного, летом и осенью – после 40–50-дневного периода без осадков [9, 10]. Окончание пожароопасного сезона приходится на конец осени, когда устанавливается устойчивый снежный покров.

Очевидно, что перечисленные факторы – циркуляция атмосферы и характер подстилающей поверхности, взаимодействуя, создают весьма сложную картину географического распределения кучево-дождевых облаков как по территории, так и от года к году и внутри пожароопасного сезона. В связи с этим целесообразно рассматривать закономерности распределения кучево-дождевых облаков и связанных с ними опасных природных явлений по крупным физико-географическим областям, таким как европейская часть Российской Федерации, Западная Сибирь, Восточная Сибирь, Дальний Восток.

Экспериментальные работы по тушению лесных пожаров искусственно вызванными осадками

Для принятия решения о проведении работ по искусственному вызыванию осадков необходимо иметь полное представление о состоянии пожароопасности леса, фактическом состоянии погоды в предполагаемом районе работ, а также о возможности ее изменения в ближайшие сутки. Распознавание и прогнозирование лесных пожаров осуществляют на базе ГИС-технологий, разрабатываемых в ГМЦ РФ и уточняемых в ряде регионов с учетом местных особенностей.

Первые опыты по искусственному вызыванию осадков из мощных кучевых облаков в целях тушения лесных пожаров были проведены в 1966–1969 гг. ЛенНИИЛХ совместно с ГГО им. А.И. Воейкова. Для воздействия на конвективные облака использовался йодистый свинец (PbI_2) и йодистое серебро (AgI) при температуре облака не выше минус 6 °С. Выпадение осадков из конвективных облаков мощностью 2000–2500 м наблюдалось через 8–12 мин после их обработки. Из 15 опытов, проведенных в Ленинградской области, положительные результаты были получены в 12, причем в 8 опытах осадки наблюдались от 15 до 40 мин на площади до 12 км².

В течение 1968–1969 гг. производилась опытная проверка метода тушения лесных пожаров искусственными осадками над территориями Сибири и Дальнего Востока. Исследования проводились в период с июня по июль на самолетах-зондировщиках и специально оборудованном для воздействий на облака самолете-метеолоборатории Ил-14 под руководством Ю.П. Сумина [12]. За два летних сезона было проведено 20 опытов, потушены пожары на площади около 12 тыс. га, в девяти опытах удалось добиться локализации пожаров, в шести опытах осадки выпали за пределами пожаров. Одной из основных причин непопадания искусственных осадков на пожар являлось отсутствие в намеченной зоне воздействия достаточно развитых по вертикали *Cu cong*. В таких случаях воздействия велись

на любые близко расположенные мощные кучевые облака в целях профилактического смачивания окружающих пожар районов.

Минлесхозом в 1970 г. при Центральной базе авиационной охраны лесов была создана специальная авиагруппа с четырьмя опытно-производственными авиазвеньями в Красноярском и Хабаровском краях, Иркутской области и Якутии. В состав звена входили экипаж самолета-зондировщика (Ли-2 или Ил-14), летчик-наблюдатель и бортаэролог. В 1970–1971 гг. этими звеньями путем искусственного вызывания осадков из мощных конвективных облаков был потушен 71 крупный лесной пожар на общей площади 120 тыс. га, искусственные осадки были вызваны на 136 пожаров. Большинство пожаров было потушено за 7–8 дней до выпадения естественных осадков, что позволило сократить срок действия пожаров и сохранить большую часть лесов от уничтожения огнем. Условный экономический эффект за счет сбереженной древесины и сохранения сырьевых баз лесозаготовительных предприятий за два сезона опытно-производственных работ составил 3,6 млн руб. в ценах того времени [1].

С 1972 г. способ тушения лесных пожаров искусственно вызванными осадками был внедрен на территории Красноярского края, Якутии и Иркутской области, несколько позже – на территории Забайкалья, Тюменской области и северных районов европейской части России. Для проведения работ была разработана и утверждена специальная инструкция [9, 10].

В 1977–1980 гг. с применением самолетных аэрозольных генераторов (САГ) были выполнены эксперименты по воздействию на мощные конвективные облака с самолета Ан-2. В этот же период под руководством Н.С. Шишкина произведено обоснование целесообразности разработки пиротехнических самолетных генераторов кристаллизующих реагентов в целях инициирования осадков из конвективных облаков для тушения лесных пожаров с применением легкомоторных самолетов типа Ан-2 [9, 10]. Для проведения работ началась разработка кассетного устройства и его летные испытания. Выполненные в 1978 г. опыты по воздействию на конвективные облака с применением САГ-2 полностью подтвердили высокую вероятность искусственного вызывания осадков из мощных конвективных облаков с переохлажденной вершиной. Результаты показали, что выбранный способ засева обеспечивает достаточно высокую вероятность стимулирования осадкообразования: 70–80 % засеянных облаков через 16–20 мин после введения реагента под облаком переходят в кучево-дождевые с выпадением осадков. Однако эти исследования не дали убедительного ответа на важный вопрос о том, в какой мере полученный результат является следствием воздействия, а в какой мере – естественного процесса. Выполненная оценка эффективности воздействия путем сравнения статистических данных о повторяемости случаев выпадения осадков из облаков, подвергнутых воздействию, и из облаков, развивающихся естественно, показала, что засеянные облака чаще переходят в дождевые, чем незасеянные.

В конце 80-х гг. прошлого столетия научно-исследовательские и конструкторские разработки, начатые Н.С. Шишкиным, завершились созданием технического устройства (КУСАГ-П) и технологии применения самолета Ан-2, оборудованного им для искусственного вызывания осадков из мощных кучевых облаков над очагами пожаров [9, 10]. В работах принимали участие Краснодарский филиал

ГосНИИГА, ГГО им. А.И. Воейкова, ЛенНИИЛХ, производственное объединение «Авиалесоохрана», НИИПХ.

В период с 10 по 28 июля 1989 г. на территории Енисейского авиаотряда Красноярской базы авиационной охраны лесов от пожаров на самолете Ан-2 были произведены опытно-производственные работы по тушению лесных пожаров. За период проведения работ было подвергнуто воздействиям 14 облачных образований. В качестве объекта для воздействия выбирались мощные кучевые облака и облачные гряды с нижней границей 1100–1900 м. Вертикальная мощность облаков, подвергшихся воздействию, отмечалась от 2,2 до 4,8 км, причем при воздействии на облака мощностью менее 2,2 км осадки после введения реагента не наблюдались.

Горизонтальные размеры облаков колебались от 2×3 км до $4,5 \times 5,0$ км; протяженность гряд облаков составляла от 10 до 15 км. Воздействия проводились в соответствии с технологией, которая включала в себя: выбор облаков, пригодных для воздействия; выбор наземной мишени (очага пожара) и рубежа воздействия; проведение воздействий в целях искусственного вызывания осадков на очаг пожара. Воздействия осуществлялись под нижней границей облачности на расстоянии 100 м от нее, на скорости полета самолета 150–180 км/ч путем приведения в действие аэрозольных генераторов в зоне восходящего потока под облаком.

В результате воздействий в 5 случаях были вызваны осадки на очаги пожаров, в 4 случаях осадки прошли мимо очагов пожаров, в 3 случаях осадки не наблюдались, и в 2 случаях искусственные осадки не удалось идентифицировать на фоне естественных, хотя и те и другие попали на очаги пожаров.

Проведенные работы показали, что применяемая технология искусственного вызывания осадков с легкомоторного самолета типа Ан-2 достаточно эффективна, однако кассетное устройство (КУСАГ-II), устанавливаемое под плоскостями самолета, увеличивает расход горючего до 20 %, что снижает продолжительность полета самолета.

Одновременно с этим в процессе работ выяснилось, что кучевые облака мощностью 2,0–2,5 км зачастую располагаются в области положительных температур до нулевой изотермы. В связи с этим в начале 1990-х гг. начались разработки нового реагента [9, 10], который имел бы преимущества прежних автономных генераторов, но был свободен от таких недостатков, как температурный порог применения. С 1991 г. тушение лесных пожаров производится по доработанной технологии с учетом облачных ресурсов и с применением пиротехнических составов как с йодистым серебром, так и с новым реагентом, получившим название «ионогенный аэрозоль» (ПВ-26 ФХС), изготавливаемым в макетах пиропатронов ПВ-26.

Разработанная в ФГБУ «ГГО» в настоящее время технология [8, 11] по искусственному вызыванию осадков при борьбе с лесными пожарами с борта воздушных судов гражданской авиации соответствует современным требованиям авиационной охраны лесов. Технология позволяет производить производственные работы по оперативному увеличению осадков применительно к особенностям ее использования для нужд лесного хозяйства при тушении лесных и торфяных пожаров и проведению профилактических работ по снижению класса пожарной опасности лесов. Применение ионогенных реагентов позволило расширить температурный диапазон проведения работ по искусственному вызыванию осадков,

так как появилась возможность проводить работы по искусственному вызыванию осадков из «теплых» облаков, то есть из облаков, расположенных в диапазоне положительных температур.

Для практики тушения лесных пожаров искусственными осадками важно установить те критерии, которые определяют вероятность выпадения осадков после засева облака реагентом. Как показали исследования, одним из таких критериев является вертикальная мощность облака. Было установлено, что чем больше вертикальная мощность облака, тем вероятнее успех вызывания осадков и их интенсивность. При $\Delta H \sim 1700 \dots 2000$ м осадки бывают слабые и непродолжительные. При воздействии на облака с $\Delta H = 2500 \dots 3500$ м в 20 % случаев выпадают ливневые осадки, в 55 % – умеренные, в остальных случаях – слабые. Облака с $\Delta H > 3500$ м дают при засеве, как правило, ливневые осадки. По продолжительности искусственные осадки резко отличаются: от нескольких минут (очень сильный ливневой дождь) до нескольких часов (умеренные осадки на большой площади) [8, 11].

Искусственное вызывание осадков из мощных конвективных облаков водным аэрозолем

Эксперименты по засеву облаков каплями воды проводились в ряде стран [9, 10].

Развивающиеся конвективные теплые облака представляют собой коллоидальную устойчивую систему при конвективной неустойчивости атмосферы, в которой небольшим импульсом в естественное развитие облака можно вызвать осадки. Процесс перехода мощных конвективных облаков из состояния коллоидно-устойчивых систем в коллоидно-неустойчивые может происходить естественным путем или искусственно вызванным. Для теплых конвективных облаков, чтобы вызвать осадки, необходимо стимулировать рост облачных капель до размера выпадающих осадков. Самый простой метод укрупнения спектра размеров капель теплого конвективного облака заключается во введении в него капель воды или гигроскопических частиц, так как льдообразующие реагенты в данном случае бесполезны. Оптимальный размер вводимых капель с нижней границы облака зависит от скорости вертикальных движений и мощности облака. Наиболее подходящими считались капли радиусом 30 мкм. Такие капли при вертикальной скорости 3 м/с и мощности облака 3–4 км возвратятся на исходный уровень, имея радиус порядка 2 мм, то есть увеличение массы составит $2,5 \cdot 10^5$ раз.

В процессе существования облака выделяют три этапа: образование, стабилизацию и диссипацию облака в результате естественного испарения облачных частиц. Из этого следует, что при интенсификации первого процесса происходит выпадение осадков, а при стимулировании второго – распад облака. Для решения задачи ИВО рассмотрим ряд вопросов, связанных с естественной эволюцией конвективного облака.

К активным методам следует отнести инициирование баллоэлектрического эффекта, который возникает в результате электризации капель при разбрызгивании в результате гравитационного падения в облаке. Впервые электризация жидкости при дроблении капель была замечена у водопадов Швейцарии в 1786 г. В 1913 г. явление получило название баллоэлектрического эффекта. Наиболее значительный

эффект электризации воздуха наблюдается у самых больших водопадов мира — у водопада Игуасу на границе Бразилии и Аргентины и у водопада Виктория на реке Замбези в Африке [9, 10]. У водопада Виктория за счет дробления воды возникает электрическое поле напряженностью до 25 кВ/м. С удалением от водосброса это поле уменьшается, и на расстоянии около 1,6 км по горизонтали и 0,5 км по вертикали электрическое поле водопада переходит в нормальное электрическое поле земной поверхности. При дроблении пресной воды в воздухе у водопадов количество отрицательных ионов превышает количество положительных.

Наибольшая электризация воздуха наблюдается при разбрызгивании чистой воды. С увеличением концентрации примесей электризация уменьшается и далее меняет знак (в естественных условиях, например у берегов морей и над морской поверхностью). Для капли диаметром 4,4 мм при скорости падения 6,8 м/с высвобождается заряд $0,89 \cdot 10^{-12}$ Кл/см³, в то время как для капли диаметром 0,4 мм при скорости падения 4 м/сек отдача заряда составляет 10^{-12} Кл/см³. При наибольшей интенсивности разбрызгивания наблюдается выход заряда порядка 10^{-10} Кл на каплю [9, 10]. Измерения зарядов облачных капель показали, что они имеют как отрицательные, так и положительные заряды.

Баллоэлектрический эффект наблюдается только у дипольных жидкостей. Основной причиной эффекта является наличие на поверхности жидкости слоя ориентированных диполей, которые создают двойной электрический слой. Электрическое поле диполей простирается на некоторую глубину внутрь жидкости и концентрирует вблизи ее границ свободные заряды.

Теория электризации при разбрызгивании капель разрабатывалась Дж. Мейсоном [9, 10] и др. исследователями. Неустойчивый размер капли наступает при радиусе $\geq 2,5$ мм. Наблюдения показывают, что капли радиусом более 2,5–3,2 мм в облаках не встречаются – они сплюсциваются и разрушаются, образуя большое число более мелких капель. В лабораторных опытах капли диаметром более 5 мм разбрызгиваются за очень малый промежуток времени. Для капель радиусом 4,25–6,25 мм, падающих в спокойном воздухе, число брызг по лабораторным измерениям, колеблется от 3 до 97 (в среднем 30–40). При разбрызгивании образуются несколько капель радиусом около 1 мм и относительно большое число мелких капель. Крупные капли выпадают в виде дождя или ливня, а мелкие – поднимаются в восходящем потоке к вершине облака, укрупняясь до критических размеров в результате электрокоагуляции. Такая цепная реакция может происходить от 3 до 6 раз с постепенным затуханием по мере вымывания водности из облака. Этот процесс происходит по времени до 30 мин.

Для реализации баллоэлектрического способа искусственного регулирования осадков предложены способ и устройство [10]. Изобретение относится к активным воздействиям на метеорологические процессы в целях искусственного регулирования осадков путем распыления водного аэрозоля с воздушных судов. Искусственное вызывание осадков осуществляется с использованием воздушного судна (Ил-76, Бе-200, Як-42, Ан-32, Ан-26, Ми-8, Ми-26 и др.) с аппаратурой для измерения метеорологических величин (температуры, характеристик влажности, скорости вертикальных движений, фазового состояния облака, микроструктуры облака, радиолокационной отражаемости облаков и др.), баками с водой (ВСУ-5 и др.),

форсунками для распыления воды («Турботак» и др.), бортовым вычислительным устройством (бортовая ЭВМ), управляющим устройством (контроллер и др.), соединенными каналами бортовой связи и каналами связи с наземным пунктом управления, совмещенным с метеорологической радиолокационной станцией (автоматизированная МРЛ-5, ДМРЛ и др.).

Распыление жидкости на самолетах и вертолетах производится под давлением с помощью струйных форсунок, к которым подводится распыляемая жидкость. Значительное влияние на качество распыления оказывают метеорологические факторы, основными из которых являются: температура воздуха, относительная влажность, скорость ветра и состояние атмосферы (наличие или отсутствие вертикальных движений воздуха). При наличии современных самолетов-танкеров типа Бе-200п и др., снабженных струйными форсунками, при необходимости распыление из одного галлона воды (3,785 л) составляет свыше 7 трлн ($7,2 \cdot 10^{12}$) капель одного радиуса.

Наряду с тушением лесных пожаров искусственно вызванными осадками из конвективных облаков, для профилактики их возникновения эффективным и перспективным методом может считаться метод, заключающийся в создании искусственных перистых кристаллических облаков (ИПКО) [4, 5]. Суть этого метода состоит в диспергировании кристаллизующих реагентов (например, йодистого серебра) в слоях атмосферы с пересыщением водяного пара надо льдом при низких отрицательных значениях температуры воздуха (ниже -30 °С) на высотах 8–12 км (чаще всего под слоем тропопаузы). Частицы кристаллизующего реагента адсорбируют водяной пар из атмосферы, увеличиваясь в размерах до облачных ледяных кристаллов перистых облаков, и диффундируют за счет турбулентности, образуя вначале облачные полосы, а после их слияния – ИПКО.

Основное преимущество данного метода заключается в том, что при создании ИПКО главным «строительным материалом» оказываются не диспергируемые частицы реагента, а водяной пар атмосферы. Масса водяного пара, осаждающегося на частицах реагента, в 10^4 – 10^5 раз превышает массу исходного распыленного вещества. При создании ИПКО спектр размеров диспергируемых частиц может быть смещен в сторону мелких частиц (диаметром 0,1–0,01 мкм и менее). В результате этого выход льдообразующих частиц с единицы массы реагента составляет 10^{12} – 10^{14} г⁻¹ (в зависимости от применяемого пиротехнического состава, типа генератора аэрозолей, способа диспергирования, температурно-влажностных характеристик атмосферы и т. д.) [4].

Наличие полей ИПКО в течение длительного времени (часы – десятки часов) и на больших площадях (100×100 , 200×200 км) приводит к значительным изменениям температурного режима у поверхности земли. Расчеты показывают, что в этом случае понижение температуры воздуха у поверхности земли может составить 5–7 °С, что, в свою очередь, исключает возможность возникновения кучево-дождевых облаков, являющихся источниками молний [7].

Следует отметить, что применяемые в настоящее время химические реагенты и их рецептуры не могут оказать сколь-нибудь значимого негативного влияния на состояние экологической обстановки в районах проведения работ по воздействию на облака и атмосферу и за их пределами, что наглядно показано проведенными исследованиями ряда авторов [7].

Физическая и экономическая оценка эффекта искусственного вызывания осадков

Экспериментальные ионогенные реагенты [9, 10] использовались ФГУ «Авиалесоохрана» для тушения лесных пожаров и снижения класса пожарной опасности лесов (КПО) в 1997–2006 гг. Результаты этих работ приведены ниже в таблице, в которой изложены обобщенные оценки за 2000–2006 гг. искусственных воздействий на лесные территории.

Обобщенные оценки искусственного вызывания осадков
в засушливый период на лесные территории РФ за 2000–2006 гг.

Год	Площадь погашенных пожаров, га	Количество полностью погашенных пожаров	Количество использованных пиропатронов с калиево-магниевым составом ПВ-26 ФХС	Количество искусственно вызванных осадков, т	Потенциальный экономический эффект, млн долл. США	Количество воздействий с выпадением осадков (числитель) и без выпадения (знаменатель)	Количество частично погашенных пожаров, на которые выпали осадки
2000	16 693	49	459	1 836 230	417,3	189/21	104
2001	945	8	159	103 950	23,62	43/16	16
2002	6570	22	479	722 700	164,25	80/31	40
2003	74 496	71	692	8 194 560	1862,4	139/37	112
2004	13 379	13	179	1 471 690	334,5	60/2	18
2005	2215	9	86	243 650	55,45	11/5	11
2006	19 030	30	366	2 093 300	475,7	129/9	42

Всего за 2000–2006 гг. ионогенными реагентами было произведено 772 воздействия на мощные кучевые облака для тушения лесных пожаров и снижения КПО лесов. Из них в 651 случае выпадали осадки (~84 %), не выпадали осадки в 121 случае (16 %); количество пожаров, на которые выпали осадки, – 545 (~85 %), из них полностью погашено пожаров – 202 (~37 %), 106 воздействий проводилось для снижения КПО лесов; использовано 2420 пиропатрона ПВ-26 ФХС. Зоны выпадения искусственно вызванных осадков соответствуют зонам выпадения естественных осадков и имеют форму эллипса или овала, вытянутых вдоль направления ветра. Длина зоны осадков из одного облака колеблется от 3 до 30 км (в 70 % случаев от 4 до 14 км), ширина – от 2 до 18 км (в 70 % случаев – от 2,5 до 5 км). Площадь искусственно вызванных осадков одним изделием ПВ-26 ФХС изменялась от 30 до 80 га в зависимости от влагосодержания атмосферы, энергии неустойчивости и других факторов. Средний объем конвективного облака мощностью от 2,5 до 3 км составляет от 9 до 10 км³. В процессе роста мощность облака может увеличиться в 2–3 раза. При средней водности облака, равной 1 г/м³ (изменяется от 0,01 до 8 г/м³), из него может быть получено от 9 до 10 тыс. т воды, а с учетом коэффициента регенерации (около 4,2) этот объем увеличивается до 37–42 тыс. т.

Применение методов ИВО в течение всего календарного года для создания запасов влаги в почве путем увеличения выпадения снега зимой и дождей в теплый период года может существенно сократить дефицит влаги. Наиболее эффективными для этих целей являются реагенты, зарекомендовавшие себя при тушении лесных пожаров [9, 10]. В результате усовершенствования реагента на основе накопленного опыта ИВО был разработан и запатентован универсальный пиротехнический состав [9, 10] для искусственного воздействия на различные виды конвективной облачности.

Заключение

Рассмотрен экологический и социальный ущерб от лесных пожаров. Лесные пожары оказывают влияние и на региональную погоду и потепление климата. Одним из методов борьбы с лесными пожарами является искусственное вызывание осадков. Анализ результатов выполненных к настоящему времени экспериментальных работ по ИВО на лесные территории для снижения КПО лесов и тушения лесных пожаров позволяет сделать вывод о том, что при определенных условиях искусственного воздействия происходит изменение микроструктуры засеянных облаков, выпадение осадков, снижение КПО, тушение лесных пожаров.

Литература

1. *Арцыбашев Е.С.* Тушение лесных пожаров искусственно вызываемыми осадками из облаков. – М.: Изд-во «Лесная промышленность», 1973. – 88 с.
2. *Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И.* Лесные пожары на территории России: Состояние и проблемы. – М.: Дзэкс-Пресс, 2004. – 312 с.
3. *Гусев В.Г., Ирицян В.А., Ирицян Е.В.* Прогнозирование параметров лесных пожаров и ресурсов для борьбы с ними. – СПб.: СПбНИИЛХ, 2011. – 218 с.
4. *Доронин А.П., Подгайский В.Н., Макаров А.В.* Предотвращение лесных пожаров путем создания искусственной облачности // Мониторинг. 1995. № 2. – С. 44–45.
5. *Возможности и пути создания полей искусственных облаков / В.А. Зайцев, Б.П. Кудрявцев, А.А. Ледохович // Метеорология и гидрология. 1977. № 7. – С. 3–9.*
6. *Иванов В.А., Иванова Г.А.* Пожары от гроз в лесах Сибири. – Новосибирск: Наука, 2010. – 166 с.
7. *Экологические аспекты российских технологий активных воздействий на облака / Н.С. Ким, В.П. Корнеев, А.В. Частухин, Г.Г. Щукин // Учен. зап. РГГМУ. 2017. № 46. – С. 91–99.*
8. *РД 52.04.674–2006.* Руководство по искусственному вызыванию осадков для охраны лесов от пожаров / В.Н. Козлов, Е.С. Арцыбашев, Д.Р. Айсин и др. – М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006. – 118 с.
9. *Козлов В.Н.* Методы искусственного вызывания осадков для борьбы с лесными пожарами. – СПб.: Изд. Инфо-да, 2011. – 202 с.
10. *Козлов В.Н., Емельянова Н.А., Корицун Н.А.* Искусственное регулирование осадков. – Saarbrücken Deutschland. Изд.: LFP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 372 с.
11. *Козлов В.Н., Клинг В.В., Лихачев А.В. и др.* РД 52.04.628-2001. Инструкция. Порядок проведения работ по искусственному вызыванию осадков из конвективных облаков при борьбе с лесными пожарами с борта легкомоторных воздушных судов. – СПб.: Гидрометеоздат, 2002. – 24 с.
12. *Сумин Ю.П.* Об опытах по тушению (локализации) лесных пожаров путем искусственного воздействия на облака // Тр. ГГО. 1971. Вып. 262. – С. 54–69.
13. *Заключение* Общественной комиссии по расследованию причин и последствий природных пожаров в России в 2010 году [Электронный ресурс]. URL: http://www.yabloko.ru/mneniya_i_publicatsii/2010/09/14 (дата обращения 05.03.2011).