

ШАРХЛАР / ОБЗОРЫ / REVIEWS

УДК: 551.509

СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ АКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПОГОДУ (2010–2025 гг.): МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ И ВОПРОСЫ АДАПТАЦИИ ДЛЯ УЗБЕКИСТАНА

Б.Ш. КАДЫРОВ^{1*}, Д.М. ТУРГУНОВ¹

¹Научно-исследовательский гидрометеорологический институт

Аннотация. В обзоре обобщены подтверждённые за 2010–2025 гг. достижения в области активных воздействий на погоду (АВ) с акцентом на управление осадками и рассеивание туманов. Рассмотрены результаты рандомизированных и/или инструментально подтверждённых кампаний (SNOWIE, WWMPP), новые электрические (безреагентные) подходы, современные методы планирования операций и воспроизведимые эксперименты по туманам. Сформулированы приоритеты адаптации для Узбекистана.

Ключевые слова: модификация погоды, засев облаков, рассеяние тумана, гляциогенный засев.

Введение. Всемирная метеорологическая организация (ВМО) в обновлённом информационном материале по модификации погоды, включающем данные до июня 2024 г., занимает нейтральную позицию: ВМО не продвигает и не отвергает практики активных воздействий (АВ), а поощряет научно обоснованные исследования, развитие наблюдательных систем, моделирование и стандарты лучшей практики.

В документе [WMO, 2024] чётко разграничиваются модификация погоды (локальные/региональные масштабы, краткие временные шкалы) и климатические интервенции (глобальные масштабы и климатические шкалы), последние не относятся к предмету заявления. Отмечается, что широкие заявления о «создании» облаков, изменении ветровых полей или полном устраниении опасных явлений не имеют надёжной доказательной базы и должны рассматриваться критически. Вместе с тем, для зимнего гляциогенного орографического засева при наличии переохлаждённой жидкой воды (SLW) показан причинно-следственный эффект, подтверждённый инструментальными измерениями (радар, лидар, трасс-химия). Для рассеивания переохлаждённых туманов применение гляциогенных материалов и/или локального охлаждения признано технологически надёжным в определённых условиях. Для гигроскопического засева тёплых конвективных облаков высокая природная вариабельность затрудняет статистическое подтверждение эффекта, что требует более строгих дизайнов экспериментов и ансамблевого моделирования. ВМО рекомендует рандомизацию событий, первичный статистический анализ с доверительными интервалами, поддержанный физическим анализом, а также оценку рисков и экологический мониторинг (включая контроль серебра и йода при применении AgI).

Резюмируя, позиция ВМО – это развитие междисциплинарных исследований, поддержка открытых данных и регулярный пересмотр национальных программ по мере накопления доказательств.

Цели обзора:

- синтезировать доказательную базу эффективности методов АВ без опоры на неподтверждённые утверждения;

* Масъул муаллиф: bkadirov53@gmail.com, тел.: +998 90 174-85-86

- выделить репрезентативные эксперименты 2010–2025 гг. и представить краткие количественные результаты;
- идентифицировать технологические тренды (UAV, электрические методы, оптимизация) и условия воспроизведимости эффекта;
- сформулировать практические ориентиры и метрики для пилотных проектов в Узбекистане.

Объект исследования – атмосферные процессы, связанные с осадкообразованием.

Предметом исследования являются технологии засева облаков и туманов.

Методология и источники. Отбор материалов: рецензируемые статьи 2010–2025 гг., отчёты международных организаций и журнальные обзоры. Приоритет – исследования с явной квантификацией эффекта и инструментальной валидацией (радар/лидар/трасс-химия), а также публикации с зарегистрированными DOI.

Международные достижения (2010–2025 гг.):

- проект SNOWIE (США) [French et al., 2018; Friedrich et al., 2020]: впервые прослежена физическая цепочка «AgI → лёд → снег на поверхности», подтверждающая базовую гипотезу гляциогенного засева;
- проект WWMPP (США) [Breed et al., 2014]: обоснованы требования к таргетированию зон SLW и подтверждена достоверность концентраций ледообразующих ядер (INP) от наземных генераторов AgI над сложным рельефом;
- электрические методы: моделирование и эксперименты показывают ускорение коалесценции за счёт зарядов и внешних полей; предложен авиабортовой излучатель заряда как безреагентный метод воздействия на облака [Guo and Xue, 2021];
- рассеивание туманов: эксперименты с твёрдым CO₂ (около -1 °C) демонстрируют ускорение диссипации в контролируемых условиях с LiDAR (лазер)-валидацией [Guo et al., 2015].

Краткие результаты репрезентативных исследований (количественные оценки):

- проект SNOWIE: при проходе «шлейфа» засева по сети осадкомеров фиксировались приращения 0,05–0,30 мм; интегральные объёмы осадков, вызванные засевом, составили порядка $1,2 \times 10^5$ – $3,4 \times 10^5$ м³ воды за 20–86 мин; длительность микрофизического ответа ~25–160 мин;
- проект WWMPP: подтверждена достоверность целевых концентраций ядер льдообразования (INP) от наземных генераторов и важность точного наведения факела AgI на зоны переохлаждённой жидкости (SLW) [Boe et al., 2014];
- электрические (безреагентные) подходы: численные расчёты и лабораторные работы демонстрируют ускорение коллизионно-коалесцентного роста; разработан прототип самолётного бортового излучателя заряда для совместного применения с традиционными самолётными пирогенераторами (фальшерами) [Harrison et al., 2024];
- туманы (около -1 °C): внесение твёрдого CO₂ (0,5–1,5 кг) уменьшало время полной диссипации с ~2701 с (саморазряд) до ~2083/1426/1130 с; видимость контролировалась при помощи LiDAR [Park et al., 2023].

Вопросы адаптации для Узбекистана:

- целевые режимы: зимние орографические облака с переохлаждённой водой (-5...-20 °C) – приоритет для гляциогенного засева; холодные долинные и аэродромные туманы – приоритет для CO₂/пропан-технологий;
- наблюдательная инфраструктура: мобильный метеорадар С/Х-диапазона, сеть осадкомеров и снегомерных маршрутов, счётчики INP/CCN, радиозондирование SLW, трасс-химия Ag/I в снегу/стоке;
- дизайн пилотных экспериментов: рандомизация «сеансов/не-сеансов», ≥20–30 эпизодов/сезон; метрики – Δмм и м³ воды (водобаланс), длительность и площадь эффекта; для туманов – время до восстановления пороговой видимости;

- технологические опции: наземные AgI-генераторы на наветренных склонах + авиа/UAV-засев при порогах SLW; для туманов – CO₂/пропан; перспективно – зарядовые излучатели (с поэтапной экологической и эксплуатационной оценкой);

- экология и норматив: соблюдение санитарно-экологических нормативов по AgI; мониторинг серебра/йода в снеге/стоке; регламенты по безопасности при обращении с CO₂ и пропаном.

В таблице приведена общая структура характеристик проектов по модификации погоды с различными целями.

Обобщенные характеристики проектов по модификации погоды

Table 1

Generalized characteristics of projects on weather modification

Условия	Метод	Ожидаемый эффект	Метрики / риски
Зимние орографические облака ($-5\ldots-20^{\circ}\text{C}$)	Гляциогенный засев (AgI, CO ₂)	Увеличение осадков на 10–20 %, снежный прирост 0,05–0,30 мм/эпизод	Метрики: Δмм, м ³ воды; риски: загрязнение Ag/I
Тёплые облака (конвекция, CCN)	Гигроскопическая засевка (NaCl, KCl)	Потенциальное усиление дождя, эффект ограничен	Метрики: интенсивность осадков, площадь по радарам; риски: экология, воспроизводимость
Холодные туманы ($T < 0^{\circ}\text{C}$)	Рассеивание CO ₂ / пропаном	Сокращение времени диссипации до 1100–2000 с	Метрики: видимость (м), LiDAR; риски: безопасность CO ₂ /пропана
Слоистые облака с SLW	Электрические методы (заряд)	Ускорение коалесценции, рост капель	Метрики: распределение капель, скорость осадков; риски: неопределенность, энергозатраты
Комплексные программы (Китай, ОАЭ)	Смешанные подходы (AgI + UAV + AI)	Рост водных ресурсов на 10–25 %	Метрики: водобаланс, эффективность NWP; риски: подветренные эффекты, высокая стоимость

Выводы. Совокупность результатов 2010-2025 гг. фиксирует переход от вероятностной эффективности к инструментально подтверждаемой квантификации при корректном дизайне операций (орографические облака со SLW, с низкими конвективными движениями, точное наведение и контроль дозы (количества регента)). Для Узбекистана наибольший потенциал связан с зимним гляциогенным засевом и целенаправленным рассеиванием переохлаждённых туманов при обязательном научном сопровождении и строгой валидации.

Вклад авторов. **Б.Ш. Кадиров:** формирование базы данных, анализ результатов, написание текста статьи, оформление статьи. **Д.М. Тургунов:** идея статьи, руководство, анализ результатов. Все авторы прочитали и согласны с подготовленной к публикации версией рукописи.

ЛИТЕРАТУРА

- Boe B.A., Heimbach J.A., Krauss T., Xue L., Chu X., McPartland J.* The dispersion of silver iodide particles from ground-based generators over complex terrain. Part I: Observations with acoustic ice nucleus counters // Journal of Applied Meteorology and Climatology, 53(6), 2014. – 1PP. 1325–1341.
- Breed D.W., Rasmussen R.M., Weeks C., Boe B., Deshler T.* Evaluating winter orographic cloud seeding: Design of the Wyoming Weather Modification Pilot Project (WWMPP) // Journal of Applied Meteorology and Climatology, 53(2), 2014. – PP. 282–299.
- French J.R., Friedrich K., Tessendorf S.A., Geerts B., Rasmussen R.M., Breed D.W.* Precipitation formation from orographic cloud seeding / Proceedings of the National Academy of Sciences, 115(6), 2018. – PP. 1168–1173.
- Friedrich K., Geerts B., Tessendorf S.A., French R.J., Rauberd R.M., Geertsc B., Xueb L., Rasmussenb R.M., Blestrude D.R., Kunkele M.L, Dawsone N., Parkinson Sh.* Quantifying snowfall from orographic cloud seeding / Proceedings of the National Academy of Sciences, 117(33), 2020. – PP. 16847–16855.
- Guo X., Fu D., Li X., Hu Z., Lei H., Xiao H., Hong, Y.* Advances in cloud physics and weather modification research in China // Advances in Atmospheric Sciences, 32, 2015. – PP. 139–152.
- Guo S., Xue H.* Enhancement of droplet collision by electric charges and atmospheric electric fields // Atmospheric Chemistry and Physics, 21(1), 2021. – PP. 69–80.
- Harrison R.G., Alkamali A.A., Escobar-Ruiz V., Nicoll K.A., Ambaum M.H.P.* Providing charge emission for cloud seeding aircraft // AIP Advances, 14(1), 2024. – PP. 015318.
- Park J., Kim N., Lee S.* A study on the effectiveness of SCD seeding fog dissipation mechanism using LiDAR sensor // Fluids, 8(6), 2023. – PP. 185.
- Ramelli F., Henneberger J., Fuchs C., Miller A.J., Omanovic N., Spirig R., Zhang H., David R.O., Ohneiser K., Seifert P., Lohmann U.* Repurposing weather modification for cloud research showcased by ice crystal growth // PNAS Nexus, 3(9), 2024. – PP. 402.
- Электрон ресурс:
- World Meteorological Organization. WMO statement/fact sheet on weather modification. June 2024. – P. 19. URL:<http://wmo.int/>

ОБ-ҲАВОГА ФАОЛ ТАЪСИР ЭТИШ СОҲАСИДАГИ ЗАМОНАВИЙ ЮТУҚЛАР (2010-2025 йй.): ХАЛҚАРО ТАЖРИБА ВА ЎЗБЕКИСТОН УЧУН МОСЛАШТИРИШ МАСАЛАЛАРИ

Б.Ш. КАДИРОВ¹, Д.М. ТУРҒУНОВ¹

¹ Гидрометеорология илмий-тадқиқот институти

Аннотация. Ушбу шарҳда 2010-2025 йилларда об-ҳавога фаол таъсир кўрсатилиши (AT) соҳасидаги тасдиқланган ютуқлар, айниқса, ёғингарчиликни бошқарши ва туманларни тарқатилии бўйича эришилган натижалар умумлаштирилган. Тасодифий ташланган ва/ёки асбоб-ускуналар ёрдамида тасдиқланган тадқиқотлар (SNOWIE, WWMPP) натижалари, янги электр (реагентсиз) ёндашувлар, амалиётларни режалаштиришининг замонавий усуллари ҳамда туманлар бўйича тақрорланадиган тажрибалар таҳтил қилинган. Ўзбекистон учун мослаштиришининг устувор ўйналишилари аниqlанган.

Калит сўзлар: об-ҳавони ўзгартириши, булутларни уруғлаши, туманни тарқатилии, музлатувчи урглаши.

MODERN ACHIEVEMENTS IN THE FIELD OF WEATHER MODIFICATION (2010-2025): INTERNATIONAL EXPERIENCE AND ADAPTATION ISSUES FOR UZBEKISTAN

B.Sh. KADYROV¹, D.M. TURGUNOV¹¹ Hydrometeorological Research Institute

Abstract. This review synthesizes evidence-based advances in weather modification achieved during 2010–2025, with emphasis on precipitation management and fog dissipation. It assesses results from randomized and/or instrumentally verified field campaigns (e.g., SNOWIE, WWMPP), recent electric (reagent-free) approaches, contemporary operational-planning methods, and reproducible fog experiments. Priorities for adaptation in Uzbekistan are outlined.

Keywords: weather modification, cloud seeding, fog dissipation, glaciogenic seeding.