
ШАРҲЛАР / 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 воспроизводимые 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 [ВМО, 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 устранении 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 воспроизводимости 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 достижимость 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 достижимость 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 самолетного бортового излучателя заряда для совместного применения с традиционными самолетными 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 C/X-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.

Таблица 1

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...–20 °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 °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: неопределённость, 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., Rauber R.M., Geerts B., Xue L., Rasmussen R.M., Blestrude D.R., Kunkle M.L., Dawson N., Parkinson S. 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., Ohnaiser 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 кўрсатиши (АТ) соҳасидаги тасдиқланган ютуқлар, айниқса, ёгингарчиликни бошқариши ва туманларни тарқатиши бўйича эришилган натижалар умумлаштирилган. Тасодифий танланган ва/ёки асбоб-ускуналар ёрдамида тасдиқланган тадқиқотлар (SNOWIE, WWMPP) натижалари, янги электр (реагентсиз) ёндашувлар, амалиётларни режалаштиришининг замонавий усуллари ҳамда туманлар бўйича такрорланадиган тажрибалар таҳлил қилинган. Ўзбекистон учун мослаштиришининг устувор йўналишлари аниқланган.

Калит сўзлар: об-ҳавони ўзгартириши, булутларни уруглаш, туманни тарқатиши, музлатувчи уруглаш.

**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.*