

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.83>**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСКУССТВЕННОГО УВЕЛИЧЕНИЯ ОСАДКОВ НА ПРИМЕРЕ СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ**

Научная статья

**Геккиева С.О.<sup>1,\*</sup>**<sup>1</sup> ORCID : 0000-0002-8369-812X;<sup>1</sup>Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (sgekkieva[at]list.ru)

**Аннотация**

Для оценки эффективности искусственного увеличения осадков был использован метод исторической регрессии. Для использования метода территория была разделена на 14 зон, характеризующихся сравнительной однородностью средних многолетних осадков. Представлена регрессионная связь между осадками на контрольной территории (КТ) и прилегающей территории (ПТ) до начала работ (1970 – 1985 гг.) и в период активных воздействий (1986 – 1997 гг.). Регрессионный анализ продемонстрировал наличие тесной связи осадков на КТ и ПТ. Эта связь описывается линейными уравнениями, коэффициент корреляции между осадками на КТ и ПТ:  $r=0,8$ . Приведены данные о дополнительных количествах осадков на сравниваемых территориях за каждый сезон активных воздействий.

**Ключевые слова:** активные воздействия, осадки, метод исторической регрессии, перераспределение осадков.

**AN EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF ARTIFICIAL PRECIPITATION INCREASE ON THE EXAMPLE OF STAVROPOL KRAI**

Research article

**Gekkieva S.O.<sup>1,\*</sup>**<sup>1</sup> ORCID : 0000-0002-8369-812X;<sup>1</sup>High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russian Federation

\* Corresponding author (sgekkieva[at]list.ru)

**Abstract**

The method of historical regression was used to evaluate the effectiveness of artificial precipitation increase. To use the method, the area was divided into 14 zones characterized by comparative homogeneity of average multiyear precipitation. The regression relationship between precipitation in the control area (CA) and the adjacent area (AA) before (1970-1985) and during the period of active influences (1986-1997) was presented. Regression analysis showed a close connection between precipitation on CA and AA. This connection is described by linear equations, correlation coefficient between precipitation on CA and AA:  $r=0,8$ . Data on additional amount of precipitation in compared territories for each season of active influences are presented.

**Keywords:** active effects, precipitation, historical regression method, redistribution of precipitation.

**Введение**

С развитием агропромышленного комплекса, промышленности и коммунального хозяйства, с ростом городов и численности населения, а также значительного уменьшения количества осадков значительно возросла потребность в пресной воде. Вопрос пополнения естественных водных ресурсов стал насущной проблемой. Одним из вариантов решения этой задачи было строительство новых водохранилищ, но климатический тренд уменьшения осадков значительно снижает эффективность этих систем. В связи с этим они не могут удовлетворить потребности в пресной воде из-за малого пополнения водозапаса за счет атмосферных осадков. В результате многочисленных изысканий в разных странах разработаны устройства и технологии для засева облаков льдообразующими ядрами с целью увеличения количества осадков. В настоящее время насчитывается несколько десятков научно-исследовательских и оперативных проектов по искусственному регулированию осадков, проводимых в различных странах мира – Австралии, США, Канаде, Израиле, Италии, Индии, Китае, что свидетельствует о значительном интересе к проблеме и ее практической значимости. Но многие проекты не предусматривают проведения исследовательских этапов, так как такие работы с самого начала направлены на получение дополнительных осадков, поэтому исследовательские работы носят исключительно фрагментарный характер.

Среди множества вопросов по активным воздействиям, которые требуют дополнительного изучения, является проблема возможного перераспределения жидких осадков на прилегающих к опытным территориям. Некоторые ученые считают, что увеличение или уменьшение количества осадков в одном районе повлечет за собой колебания количества осадков в районах, расположенных с подветренной стороны от районов воздействия, в которых осуществлялся засев облаков [1]. Все это обуславливает необходимость более тщательного анализа. Для изучения вопроса возможного перераспределения жидких осадков на прилегающих к опытным территориям был выбран Ставропольский край.

Ставропольский край является одним из важнейших сельскохозяйственных регионов Российской Федерации. Ведущей отраслью экономики края является агропромышленный комплекс, который обеспечивает более 30% прибыли. Ставропольский край расположен на юго-западе России и обладает уникальной ландшафтной структурой,

где сочетаются особенности Русской равнины и Большого Кавказа. В последнее время отмечается глобальное потепление климата, которое в разных регионах имеет свои особенности, а Ставропольский край находится в зоне риска, часто оказываясь в сложных погодно-климатических условиях. Отсутствие влаги в метровом слое и сильные заморозки приводят к крайне негативным последствиям для отрасли. Для регулирования остро вставшей проблемы было принято решение начать на территории Ставропольского края опытные работы с целью искусственного увеличения осадков.

В настоящем исследовании при выборе прилегающей территории (ПТ) исходили из структуры полигонов Ставропольской службы. В качестве ПТ были приняты территории, расположенные восточнее от территории активных воздействий. Для статистического анализа вопроса перераспределения количества осадков был использован метод исторической регрессии. Необходимо отметить, что при выборе данного метода были соблюдены все требования, определяющие возможность его использования [1], [3], [5], [6]. Результаты выполненного в этом направлении исследования приведены ниже.

### Материалы и методы исследования

В работе представлен статистический анализ, разработанный на основе метода исторической регрессии и предназначенный для оценки работ по искусственному увеличению осадков (ИУО) на большой территории [7], [8], [9], [10]. Территории для оценки были выбраны так, что соответствуют основным требованиям для их дальнейшего сравнения методом исторической регрессии. К числу основных требований относится следующее: сходные физико-географические характеристики; близкие по площади воздействия размеры, близкая к ним плотность наземной осадкомерной сети, примерно одинаковая с ней длина рядов наблюдений за осадками; устойчивая во времени корреляционная связь осадков между сравниваемыми территориями за возможно более длительный ряд лет до начала активных воздействий.

В качестве контрольных территорий были взяты: Минеральные Воды, Кисловодск, Карачаевск. Прилегающие территории: Нальчик, Прохладный, Терек, Каменноостское, Моздок, Южно-Сухокумск, Терекли-Мектеб, Кочубей. Выбор контрольных станций и оценка результатов воздействий производится по отдельности для каждой из территорий. Также по отдельности выполняется оценка для каждого сезона работ.

Наличие высокой корреляции количества осадков между сравниваемыми территориями и отсутствие влияния активных воздействий на контрольных территориях позволяет использовать данный метод. Базовыми данными, на которых основывается метод, являются осредненные данные осадков за весенне-летний сезон (май-август) с отдельных метеостанций. Осреднение осадков дает возможность снизить коэффициенты вариации осадков. Расчетный период выбран с 1970 по 1985 годы, т.к. с 1986 г. на территории Ставропольского края были начаты работы по АВ на конвективные облака с целью ИУО, в связи, с чем был нарушен естественный режим выпадения атмосферных осадков.

Временной ход количества осадков по всему региону показывает, что количество осадков на всей территории имеет квазипериодические колебания с циклами от 2 до 6 лет (рис.1). Годы максимума и минимума по всем исследуемым районам совпадают. Анализ временного хода также показывает, что в период с 1971 по 1977 г. отмечается увеличение количества осадков на всей исследуемой территории, а с 1977 по 1979 г. отмечается устойчивая тенденция уменьшения среднего количества осадков за сезон (май-август) на всей территории. Определенная синхронность такой картины, скорее всего, обусловлена тем, что основное количество осадков выпадает при фронтальных процессах, проходящих по всему региону.

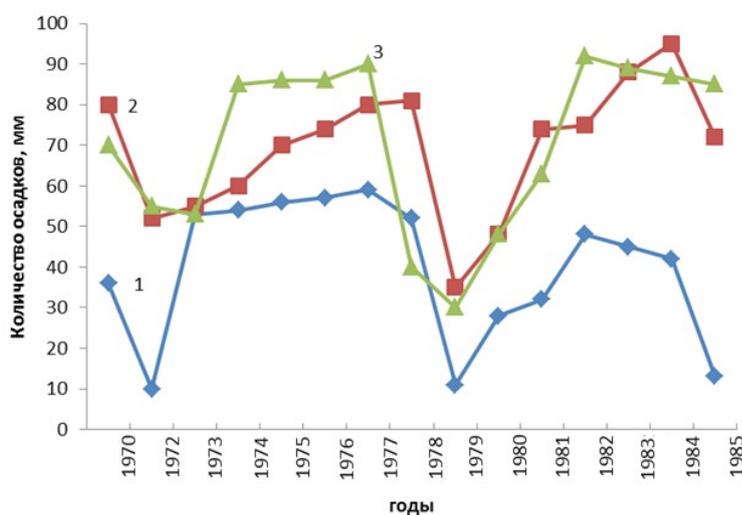


Рисунок 1 - Временной ход осадков (май-август) на контрольных и прилегающих территориях  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.83.1>

### Результаты исследования и их обсуждение

Прежде чем начать статистический анализ эффекта перераспределения количества осадков необходимо убедиться в том, что длина статистических рядов данных достаточна для получения статистически значимых результатов. Для оценки достаточности рядов данных для получения статистически значимых выводов проводится экзамен на t-тест, предполагая, что выборки, имитирующие генеральные совокупности  $\{N_{si}\}$  и  $\{N_{ci}\}$  состоят из нормально распределенных случайных величин с параметрами  $\bar{N}_s = MN_{si}$ ,  $\delta_s^2 = DN_{si}$  и  $\bar{N}_c = MN_{ci}$ ,  $\delta_c^2 = DN_{ci}$  соответственно, где  $M$  – математическое ожидание, а  $D$  – дисперсия рассматриваемых параметров. Воспользовавшись статистикой  $t$  Стьюдента для сравнения средних двух независимых нормальных совокупностей, строится односторонний доверительный (с уровнем доверия  $1-\alpha$ ) интервал  $(-\infty, (N_s - N_c)_k)$  для величины  $\bar{N}_s - \bar{N}_c$ . При этом критическое значение  $(N_s - N_c)_k$  связано с верхней квантилью  $t_\alpha$  (подсчитанной с помощью нормальной аппроксимации) уровня  $\alpha$  распределения Стьюдента (44) с  $(n_s+n_c-2)$  степенями свободы соотношением:

$$t = \frac{\bar{N}_s - \bar{N}_c}{\sqrt{(n_s-1)\delta_s^2 + (n_c-1)\delta_c^2}} \sqrt{\frac{n_s n_c (n_c + n_s - 2)}{n_c + n_s}} \quad (1)$$

Отсюда для интересующего нас эффекта искусственного увеличения осадков, получим критическое для t-теста значение эффекта ИУО  $E_k(\%)$ :

$$E_k = t'_{2\alpha} \frac{\delta_c}{N_c} \sqrt{\frac{(n_c-1)\delta_s^2/\delta_c^2 + (n_c-1)}{n_s + n_c - 2}} \left( \frac{1}{n_s} + \frac{1}{n_c} \right) \quad (2)$$

где  $t'_{2\alpha}$  – верхняя квантиль уровня  $2\alpha$  распределения величины  $|t|$ ;  $\delta_s$ ,  $\delta_c$  – среднее квадратичное отклонение количества осадков в годы активных воздействий и до воздействий соответственно;  $n_s$  и  $n_c$  – количество лет активных воздействий и количество лет наблюдений до активных воздействий (т.е. за экспериментальную единицу принят год).

Для проведения t-теста необходимо сравнить фактическое значение эффективности  $E$  с критическим  $E_k$ , найденным по формуле (2). Если  $E > E_k$ , то эффективность искусственного увеличения осадков считается значимой при выбранном уровне значимости  $\alpha=0,05$ , и количество лет до ИУО и в период ИУО достаточным для статистически значимого вывода о том, что увеличение осадков обусловлено активными воздействиями, а не природной изменчивостью. Если же  $E \leq E_k$ , то можно предполагать, что активные воздействия не привели к существенным изменениям осадков, т.е. среднестатистические изменения сравнимы с естественной изменчивостью количества осадков и нет оснований утверждать, что эффект увеличения осадков присутствует. На основе статистического анализа было получено, что длина статистических рядов данных (1970-1997гг.) достаточна для получения статистически значимых результатов.

Для оценки эффекта перераспределения количества осадков была использована, полученная с помощью регрессионного анализа связь количества осадков на контрольной (x) и прилегающей территории (y):

$$y = 0,7x + 38 \quad (3)$$

Получен коэффициент корреляции между осадками, сравниваемых территорий  $r = 0,8$ . Для оценки коэффициента корреляции  $r$ , генеральной совокупности воспользуемся формулой:

$$r - \frac{1-r^2}{\sqrt{n}} \leq r_r \leq r + \frac{1-r^2}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

Необходимо проверить гипотезу о значимости выборочного коэффициента корреляции. То есть при уровне значимости 0,05 проверим нулевую гипотезу о равенстве нулю генерального коэффициента корреляции  $H_0: r = 0$ . В качестве критерия проверки нулевой гипотезы принимается случайная величина

$$T_{\text{набл.}} = \frac{r\sqrt{n-2}}{1-r^2} = 4,93 \quad (5)$$

По уровню значимости 0,05 и числу степеней свободы  $k$ , находим по таблице распределения Стьюдента критическую точку двусторонней критической области  $t_{кр}$ :

$$t_{кр}(0,05;16) = 2,12.$$

Поскольку  $T_{\text{набл.}} > t_{кр}$ , нулевую гипотезу отвергаем. Следовательно, выборочный коэффициент корреляции значимо отличается от нуля, т.е. осадки на прилегающей и контрольной территории коррелированы.

Погрешность определения ожидаемого количества осадков на прилегающей территории по уравнению регрессии (1) равна среднее квадратичному отклонению от уравнения регрессии:

$$s = s_{\text{ит}} \sqrt{1-r^2} \quad (6)$$

$$s = \pm 11,4(\text{мм}).$$

В таблице 1 приведены данные о дополнительных количествах осадков, рассчитанных по уравнению 3 и фактических осадках на сравниваемых территориях за каждый год проведения активных воздействий. Анализ результатов сезонной эффективности воздействия для Ставропольского края в целом (табл.1) показал, что за 10 лет сезонов работ было получено от 6,8 - 48,8 мм дополнительной воды, что составило 11-19% от естественных осадков.

Таблица 1 - Оценка сезонной эффективности воздействий для Ставропольского края в 1986-1996 гг.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.83.2>

| Сезон     | Фактическое количество осадков, мм | Оценка количества осадков, мм | Эффективность воздействия, мм | Относительная эффективность, % |
|-----------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 1986-1987 | 75,67                              | 65,2                          | 10,5                          | 12                             |
| 1987-1988 | 84,8                               | 74,3                          | 12,5                          | 11,4                           |
| 1988-1989 | 102                                | 53,2                          | 48,8                          | 19                             |
| 1989-1990 | 89,7                               | 86,43                         | 3,27                          | 10                             |
| 1990-1991 | 82,6                               | 62,8                          | 19,8                          | 13                             |
| 1991-1992 | 110                                | 100,3                         | 9,7                           | 11                             |
| 1992-1993 | 84,3                               | 68,2                          | 16,1                          | 12                             |
| 1993-1994 | 78,6                               | 71,8                          | 6,8                           | 11                             |
| 1994-1995 | 56,5                               | 45,5                          | 11                            | 12,4                           |
| 1995-1996 | 47,3                               | 40,3                          | 7                             | 11,7                           |

Также для оценки значимости эффекта воздействия в единичном эксперименте (за один сезон) применяется метод трех дельта [8], если  $|\Delta y| > \sigma(y)$ , то об эффекте воздействия можно говорить с доверительной вероятностью 68%; если  $|\Delta y| > 2\sigma(y)$  – доверительная вероятность равна 95 %; если же  $|\Delta y| > 3\sigma(y)$  – доверительная вероятность практически 100% [8], [9]. В практике работ по ИУО удовлетворительной считается доверительная вероятность 68%, т.е. условие  $|\Delta y| > \sigma(y)$  [1].

Таким образом, при статистической оценке годовых результатов работ отдельно получаем, что количество дополнительных осадков за сезон должно быть  $|\Delta y| > 11,4$  мм, чтобы с доверительной вероятностью 68% говорить о значимом эффекте перераспределения количества осадков. При статистической оценке результатов работ за весь период получаем, что количество дополнительных осадков в 5,7мм значимо на уровне значимости 0,5.

Проанализировать эффект перераспределения количества осадков за каждый отдельно взятый год с активными воздействиями, необходимо выяснить к какому году он относится – с избытком или наоборот с дефицитом осадков. Для этого воспользуемся методом интегральных кривых, где отклонения от нормы имеют положительный знак, т.е.

$K = \frac{X_i}{\bar{X}} - 1$ , соответствует году с избытком осадков, а участок с отрицательным значением  $K$  – периоду с дефицитом осадков. Здесь  $X_i$  – месячная сумма осадков за каждый год,  $\bar{X}$  – месячная норма осадков.

Таблица 2 - Расчет коэффициента влажности  $K$ DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.126.83.3>

| Годы | $X_i$ (мм) | $K$   |
|------|------------|-------|
| 1986 | 75,67      | -0,07 |
| 1987 | 84,8       | 0,04  |
| 1988 | 102        | 0,3   |
| 1989 | 89,7       | 0,1   |
| 1990 | 82,6       | 0,02  |
| 1991 | 110        | 0,4   |
| 1992 | 84,3       | 0,04  |
| 1993 | 78,6       | -0,03 |
| 1994 | 56,5       | -0,3  |
| 1995 | 47,3       | -0,4  |

Среднеарифметическое количество осадков на прилегающей территории  $X_i = 81$  мм.

Полученные результаты, позволяют говорить о том, что на прилегающей к опытной территории не наблюдается эффект перераспределения количества осадков, т.к. колебания количества осадков не выходят за пределы природных колебаний за исключением 1988 г.

#### Заключение

Всего за период (1986-1997 гг). были проанализированы данные для шести точек контрольной и восьми точек на прилегающей территории. Из таблицы 1 видно, что при рассмотрении всей совокупности засеянных и контрольных территорий без стратификации опытов наблюдается положительный эффект.

Результаты, полученные на основе метода исторической регрессии и метода трех дельта, подтверждают, что количество дополнительных осадков за сезон активных воздействий должно быть  $\Delta y > 11,4$  мм, чтобы говорить о значимом эффекте перераспределения осадков с доверительной вероятностью 68%. Исключением является только один сезон активных воздействий (1988 г), когда год сам по себе является с достаточным количеством влаги, и где относительная эффективность в 1,7 превышает ожидаемое количества осадков. Отнести этот факт к перераспределению осадков из-за активных воздействий на соседних территориях сложно.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Колосков Б.П. Методы и средства модификации облачности, дождя и тумана / Б.П. Колосков, В.П. Корнеев, Г.Г. Щукин. — СПб: РГГМУ, 2012. — 123 с.
2. Абшаев М.Т. О влиянии противогородовых работ на интенсивность и количество осадков / М.Т. Абшаев, Л.Н. Климовская // Труды ВГИ. — 1976. — Вып. 33. — 54 с.
3. Абшаев М.Т. Анализ вариантов увеличения осадков на локальной территории / М.Т. Абшаев, А.М. Абшаев // Труды ВГИ. — 2017. — Вып.100. — 76 с.
4. Бартишвили И.Т. Оценка влияния противогородовой защиты на режим осадков защищаемых и контрольных территорий Южной и Восточной Грузии / И.Т. Бартишвили и др. // Труды ГГО. — 1986. — Вып. 497. — 47 с.
5. Бартишвили Я.Т. Исследование влияния противогородовой защиты на режим осадков Центральной части Южной Грузии / Я.Т. Бартишвили, М.Р. Ватян, Н.И. Капанадзе и др. // Материалы Всесоюзного семинара по физике образования градовых процессов и активных воздействий на них. — М.: Гидрометеиздат, 1988. — 114 с.
6. Ватишвили М.Р. Изменение режима осадков в регионе Центрального Кавказа при проведении противогородовой защиты / М.Р. Ватишвили // Наука. Инновации. Технологии. — 2019. — 2. — с. 88-96.
7. Гмурман В.С. Теория вероятностей и математическая статистика / В.С. Гмурман. — М.: Высшая школа, 1972. — 368 с.
8. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений / А.К. Митропольский. — М.: Физматгиз, 1961. — 97с.
9. Шипилов О. Применение статистических методов оценки эффективности работы на повышение осадков. Гидрометеорология. / О. Шипилов. — Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1983. — 28 с.
10. Gekkieva S. and Sherkhov A. Statistical estimation of the effect of precipitation redistribution using the historical regression method / S. Gekkieva // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.1083 012096. — 2021.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Koloskov B.P. Metody i sredstva modifikacii oblachnosti, dozhdy i tumana [Methods and equipments of cloud, rain and fog modification] / B.P. Koloskov, V.P. Korneev, G.G. Shchukin. — St Petersburg: RSHU Publishers, 2012. — 123 p. [in Russian]
2. Abshaev M.T. O vliyaniy protivogradovykh rabot na intensivnost' i kolichestvo osadkov [On the influence of anti-hail work on the intensity and amount of precipitation] / M.T. Abshaev, L.N. Klimovskaya // Trudy VGI [Proceedings of HMG]. — 1976. — Iss. 33. — 54 p. [in Russian]
3. Abshaev M.T. Analiz variantov uvelicheniya osadkov na lokal'noj territorii [Analysis of options for increasing rainfall in the local territory] / M.T. Abshaev, A.M. Abshaev // Trudy VGI [Proceedings of HMG]. — 2017. — Issue 100. — 76 p. [in Russian]
4. Bartishvili I.T. Ocenka vliyaniya protivogradovoj zashchity na rezhim osadkov zashchishchaemykh i kontrol'nykh territorij YUzhnoj i Vostochnoj Gruzii [Assessment of the impact of anti-hail protection on the precipitation regime of the protected and control territories of southern and eastern Georgia] / I.T. Bartishvili et al. // Trudy GGO [Proceedings of the Main Geophysical Observatory]. — 1986. — Issue 497. — 47 p. [in Russian]
5. Bartishvili Ya.T. Issledovanie vliyaniya protivogradovoj zashchity na rezhim osadkov Central'noj chasti YUzhnoj Gruzii [Investigation of the effect of anti-hail protection on the precipitation regime of the Central part of South Georgia] / Ya.T. Bartishvili, M.R. Vatyani, N.I. Kapanadze et al. // Materialy Vsesoyuznogo seminar po fizike obrazovaniya gradovykh processov i aktivnykh vozdeystvij na nih [Materials of the All-Union seminar on the physics of the formation of hail processes and active influences on them]. — M.: Gidrometeoizdat, 1988. — 114 p. [in Russian]
6. Vatiashvili M.R. Izmenenie rezhima osadkov v regione Central'nogo Kavkaza pri provedenii protivogradovoj zashchity [Changes in the precipitation regime in the Central Caucasus region during anti-hail protection] / M.R. Vatiashvili // Nauka. Innovacii. Tekhnologii [Science. Innovation. Technology]. — 2019. — 2. — p. 88-96. [in Russian]
7. Gmurman V.S. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika [Theory of Probability and Mathematical Statistics] / V.S. Gmurman. — M.: Higher school, 1972. — 368 p. [in Russian]

8. Mitropolsky A.K. Tekhnika statisticheskikh vychislenij [Technique of statistical calculations] / A.K. Mitropolsky. — Moscow: Fizmatgiz, 1961. — 97 p. [in Russian]
9. Shipilov O. Primenenie statisticheskikh metodov ocenki effektivnosti raboty na povyshenie osadkov. Hidrometeorologiya [The use of statistical methods to assess the effectiveness of work to increase precipitation. Hydrometeorology] / O. Shipilov. — Obninsk: VNIIGMI-MCD, 1983. — 28 p. [in Russian]
10. Gekkieva S. and Sherkhov A. Statistical estimation of the effect of precipitation redistribution using the historical regression method / S. Gekkieva // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.1083 012096. — 2021.