

*А.В. Клейменова, Б.П. Колосков, В.П. Корнеев,
В.И. Лозовой, И.И. Акимова*

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ РАБОТ
ПО ИСКУССТВЕННОМУ УВЕЛИЧЕНИЮ ОСАДКОВ
НА ЭТАПЕ ИХ ПЛАНИРОВАНИЯ**

A.V. Kleimenova, B.P. Koloskov, V.P. Korneev, V.I. Lozovoy, I.I. Akimova

**EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF PRODUCTION WORKS
ON ARTIFICIAL RAIN ENHANCEMENT
AT THE PLANNING STAGE**

В статье рассматриваются результаты исследований корреляционных зависимостей между урожайностью и количеством осадков для трёх сельскохозяйственных культур – озимой пшеницы, картофеля и сахарной свеклы, выращиваемых на территории Ставропольского края. Приводятся характеристики облачности и осадков, свидетельствующие о наличии в регионе облачных ресурсов для проведения в мае-июне работ по активным воздействиям на облака с целью увеличения осадков. Описывается алгоритм и результаты прогноза экономической эффективности производственных работ по искусственному увеличению атмосферных осадков для нужд сельского хозяйства с использованием самолетного метода.

Ключевые слова: искусственное увеличение осадков, засев облаков, урожайность, экономическая эффективность.

The results of studies of correlations between yield and rainfall for the three agricultural crops – wheat, potatoes and sugar beets grown in territory of the Stavropol region are discussed. Characteristics of clouds and precipitation indicate the presence of cloud resources for weather modification works to increase precipitation in the region during the May-June period. Algorithm and results of the economic efficiency forecast of production works on the artificial increase of rainfall for agriculture using aircraft method are described.

Key words: artificial precipitation enhancement, cloud seeding, crop, economic efficiency.

Введение

Как известно, более 60% территории Российской Федерации представляют собой зоны рискованного земледелия, в том числе в связи с недостатком осадков, необходимых в период вегетации сельскохозяйственных культур.

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования, выполненные в различных регионах мира, свидетельствуют о том, что использование современных технологий искусственного увеличения осадков методами активных воздействий (АВ) на облака позволяет увеличить месячное количество осадков в среднем на 10-30% от их нормы [3]. При этом естественно возникает вопрос об экономической эффективности работ по искусственному увеличению осадков (ИУО), в частности, для нужд сельского хозяйства. Проблеме оценки экономической эффективности работ по ИУО посвящен целый ряд исследований [1, 4, 8].

Так результаты оценки эффективности работ по ИУО на территории Ставропольского края в 1986–1990 гг., полученные для озимой пшеницы, свидетельствуют о высокой экономической эффективности АВ на облака в вегетационный период май-июнь [8]. Рентабельность работ по ИУО составила 1:10. Аналогичные результаты были получены при оценке эффективности АВ, выполненных в Закавказье в 1986–1990 гг. [4]. Так согласно оценкам рентабельность производственных работ по ИУО в бассейнах р. Иори и оз. Севан составила в зависимости от возделываемых сельскохозяйственных культур, сезона и способа засева облаков от 1:5 до 1:10.

Оценка экономической эффективности работ по ИУО основывается, как правило, на определении приращения осадков за счет ИУО и моделях «урожай – осадки», описывающих зависимость урожайности от осадков. Для определения связей между урожайностью сельскохозяйственных культур и осадками, как правило, используются статистические методы, а именно, корреляционный анализ [2, 5, 6, 7].

В настоящей работе рассматриваются результаты исследования корреляционных зависимостей между урожайностью и осадками для трёх сельскохозяйственных культур – озимой пшеницы, картофеля и сахарной свеклы, выращиваемых на территории Ставропольского края в последнее десятилетие с 2003 по 2011 гг., приводятся характеристики облачности и осадков и оценка экономической эффективности производственных работ по ИУО с использованием самолетных средств воздействий на облака.

1. Исследование корреляционных зависимостей между урожайностью сельскохозяйственных культур и осадками

Исследование зависимости урожайности сельскохозяйственных культур от количества осадков проводилось с использованием:

- 1) данных о месячных количествах осадков, измеренных 16 наземными метеостанциями на территории Ставропольского края в 2003–2011 гг. (рис. 1).
- 2) данных об урожайности сельскохозяйственных культур за этот же период.

Для исследования связи урожайности с осадками, выпавшими за выбранный период времени, использовались линейные уравнения регрессии вида:

$$Q = a + \sum_{i=1}^n b_i P_i \quad \text{– модель 1} \quad (1)$$

$$Q = a + b P_{\text{ср}} \quad \text{– модель 2} \quad (2)$$

где Q – урожайность сельхозкультур, ц/га; P_i – количество осадков, мм, измеренных i -й метеостанцией; $P_{\text{ср}}$ – среднее количество осадков, выпавших на территории края за выбранный период времени. Коэффициенты a и b определяются методом наименьших квадратов по данным анализируемого периода 2003–2011 гг.



Рис. 1. Карта Ставропольского края и метеостанции,

данные которых использовались для исследования связи «урожай – осадки». 1 – Арзгир, 2 – Александровское, 3 – Светлоград, 4 – Ставрополь, АМСГ, 5 – Невинномыск, 6 – Новоалександровск, 7 – Красногвардейское, 8 – Кисловодск, 9 – Рожино, 10 – Благодарный, 11 – Буденновск, 12 – Мин. Воды, 13 – Георгиевск, 14 – Дивное, 15 – Зеленокумск, 16 – Изобильный

Следует отметить, что при использовании регрессионной модели (1) возникает задача выбора набора независимых переменных P_i , адекватно описывающих изучаемый объект. Так, в нашем случае – точно предсказать урожайность выбранной для анализа сельхозкультуры по данным об осадках, полученным 16 метеостанциями. Для этого необходимо правильно отобрать такие станции, которые дали бы наименьшую ошибку прогноза урожайности.

В качестве меры согласия модели регрессии с имеющимися данными широко используется коэффициент детерминации R^2 , т.е. квадрат множественного коэффициента корреляции R , численно выражающий долю дисперсии зависимой переменной, объясненную с помощью регрессионного уравнения. Однако, критерий R^2 в нашем случае непригоден для процедуры отбора подмножества предикторов, так как при сравнении подмножеств та модель, которая включает больше предикторов, будет иметь большее значение R^2 [5, 6].

В случае переменного числа предикторов вместо R^2 в качестве критерия качества прогноза по уравнению регрессии следует использовать его модификацию – скорректированный коэффициент детерминации, определяемый как

$$R_a^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-k}, \quad (3)$$

где k – количество членов в регрессионном уравнении (1); n – количество лет, используемых для анализа. При этом наилучшим регрессионным уравнением, обеспечивающим минимальную ошибку прогноза, считается уравнение с подмножеством переменных, обеспечивающих наибольшее значение R_a^2 [2, 5, 6].

Для исследования зависимости урожайности от осадков были построены регрессионные модели связи урожайности трех сельскохозяйственных культур (озимой пшеницы, картофеля и сахарной свеклы) от количества осадков, выпавших в различные периоды года – в осенний (сентябрь–октябрь–ноябрь) и весенний (май–июнь) периоды.

Анализ результатов исследований моделей «урожай–осадки», описываемых уравнениями (1) и (2), показал, что для выбранных для анализа сельхозкультур статистически значимая (на уровне 0,05) связь урожайности для озимой пшеницы наблюдается с осадками, выпавшими в июне и мае-июне, а для картофеля и сахарной свеклы – в мае и мае-июне. При этом для всех трех сельхозкультур наибольшая связь урожайности наблюдается с осадками, выпавшими в вегетационный период май-июнь (рис. 2–4).

Так, коэффициенты корреляции между урожайностью и количеством осадков, выпавших в мае-июне, оказались равными:

для озимой пшеницы – $R_{оз.пш} = 0,899$ (модель 1) и $R_{оз.пш} = 0,827$ (модель 2);

для картофеля – $R_{карт} = 0,982$ (модель 1) и $R_{карт} = 0,881$ (модель 2); для сахарной свеклы – $R_{сах.св} = 0,971$ (модель 1) и $R_{сах.св} = 0,803$ (модель 2).

Таким образом, выполненные исследования свидетельствуют о высокой степени зависимости урожайности выращиваемых на территории Ставропольского края озимой пшеницы, картофеля и сахарной свеклы от выпадающих в мае-июне осадков, что позволяет использовать полученные корреляционные связи для прогноза урожайности этих сельскохозяйственных культур на основе данных об осадках. В свою очередь прогноз урожайности может быть использован, как это будет показано ниже, для оценки экономической эффективности работ по ИУО.

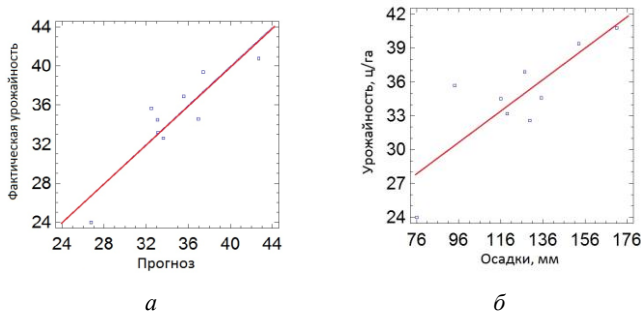


Рис. 2. Корреляционная зависимость между урожайностью озимой пшеницы и количеством осадков в мае-июне (а – модель 1; б – модель 2)

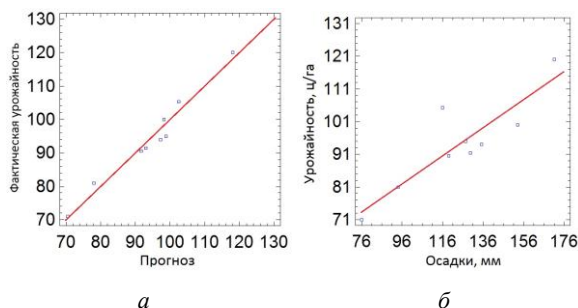


Рис. 3. Корреляционная зависимость между урожайностью картофеля и количеством осадков в мае–июне (*a* – модель 1; *б* – модель 2)

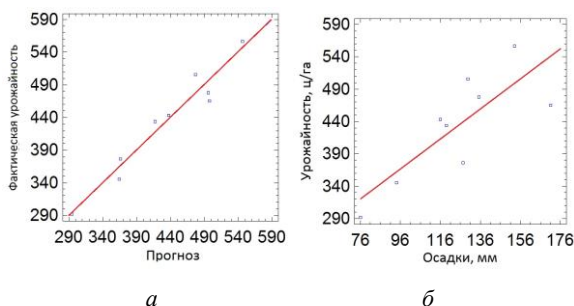


Рис. 4. Корреляционная зависимость между сахарной свеклой и количеством осадков в мае–июне (*a* – модель 1; *б* – модель 2)

2. Характеристики облачности и осадков в Ставрополье в мае–июне

Как отмечено во введении оценка экономической эффективности работ по ИУО наряду с использованием моделей «урожай-осадки» предполагает использование информации о количестве дополнительных осадков, которые можно получить в результате АВ на облака. Наличие такой информации позволяет по приращению осадков за счёт работ по АВ оценить прирост урожайности для выбранных сельхозкультур и рассчитать экономический эффект ИУО.

Очевидно, что эффективность проведения работ по ИУО на заданной территории в значительной степени зависит от облачных ресурсов, т.е. от наличия облаков, пригодных для воздействия, а также вклада осадков из этих облаков в общий слой осадков на выбранной площади. Ниже приводятся результаты анализа характеристик облачности и осадков, полученных по данным регулярных 3-часовых наблюдений за облачностью и осадками на метеостанции Минеральные Воды (№ 12, рис. 1), а также по данным радиозондирования, выполняемым в сроки 4 и 16 ч (местное время) в аэропорту Минеральные Воды.

Анализ данных наблюдений на метеостанции Минеральные Воды за период 2005–2012 гг. показал, что в мае в среднем 49 % месячного количества осадков выпадает в дневное время (с 10 до 22 ч) и 51 % в ночное время (с 22 до 10

ч). В июне 51 % месячного количества осадков выпадает в дневное время и 49 % в ночное время. Таким образом, в дневное и ночное время суток в мае и июне выпадает практически одинаковое количество осадков. Однако, как видно из рис. 5, наблюдается значительная изменчивость как дневных, так и ночных осадков. Так, в мае дневные осадки менялись от 20,3 до 74,8 мм, а ночные – от 9,6 до 78,7 мм, а в июне менялись от 1,6 до 95 мм днём и от 9,5 до 79,3 мм ночью. При этом коэффициенты вариации, характеризующие изменчивость осадков, составили $C_{VD} = 0,45$ и $C_{VN} = 0,58$ в мае и $C_{VD} = 0,70$ и $C_{VN} = 0,60$ в июне.

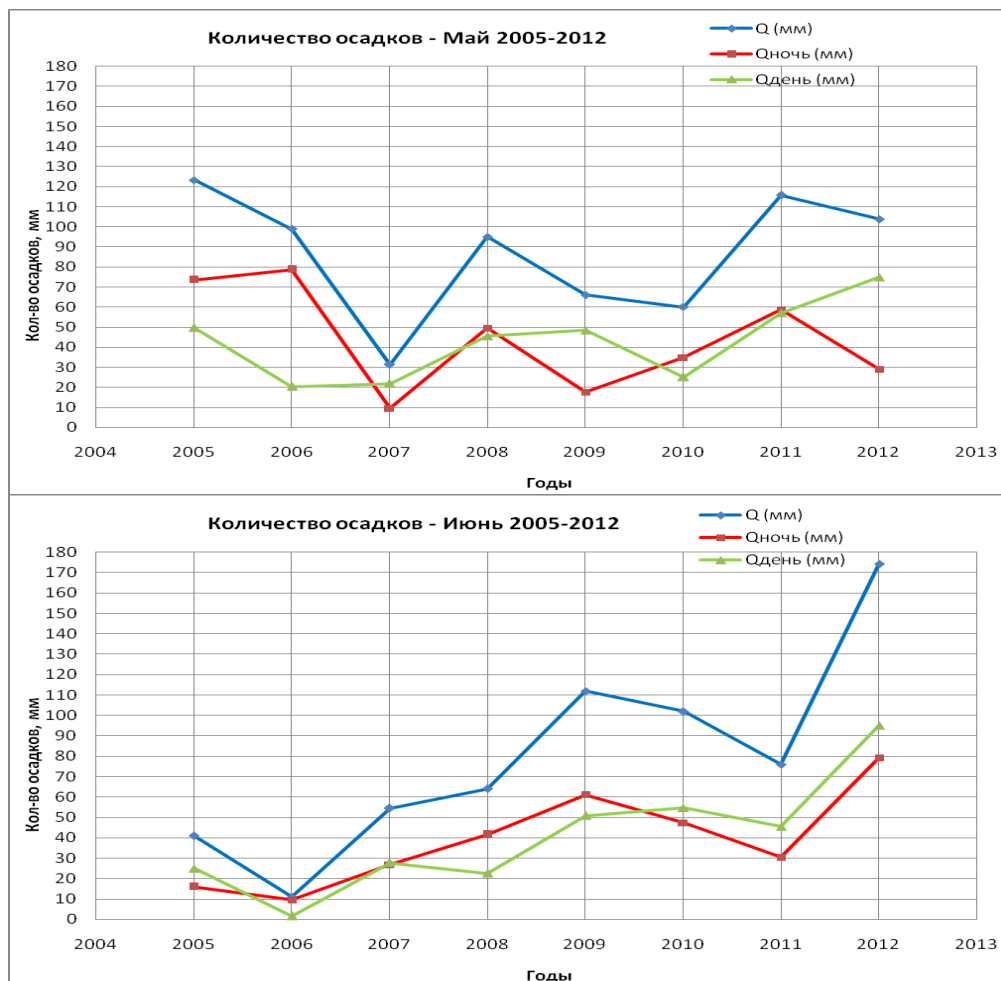
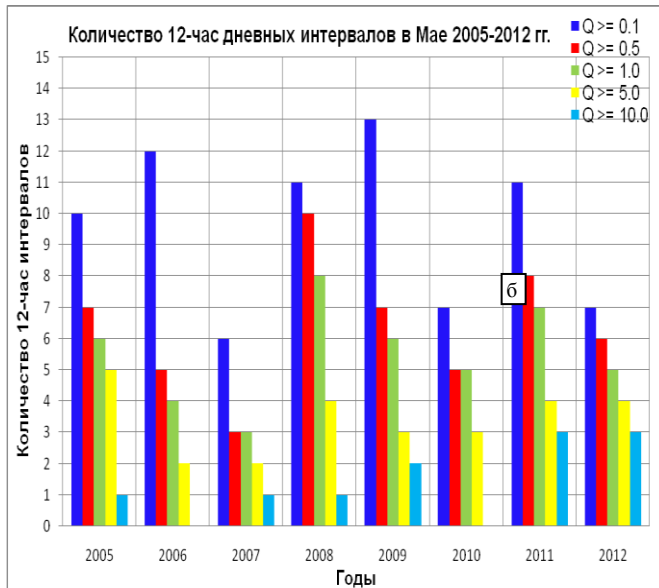


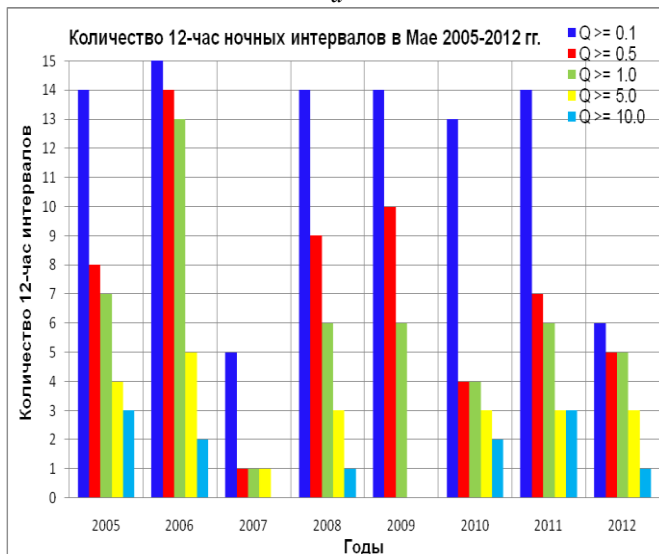
Рис. 5. Количество осадков в Минеральных Водах в мае и июне 2005-2012 гг.

Анализ данных также показал, что в мае наблюдалось 6–13 дневных и 5–15 ночных случаев выпадения осадков (рис. 6), т.е. в мае в среднем было отмечено 9,6 случаев выпадения осадков в дневной и 11,9 случаев в ночной периоды. При

этом 3–8 случаев дневных и 1–13 случаев ночных осадков в мае дали более 90 % месячного дневного и ночного количества осадков, соответственно. В июне наблюдалось 6–12 дневных и 8–14 ночных случаев выпадения осадков (рис. 7), т.е. в июне в среднем отмечено 9,1 случаев выпадения осадков в дневной и 10,3 случаев в ночной периоды. При этом 2–7 случаев осадков в июне днём и 3–9 случаев осадков ночью дали более 90 % месячного дневного и ночного количества осадков.



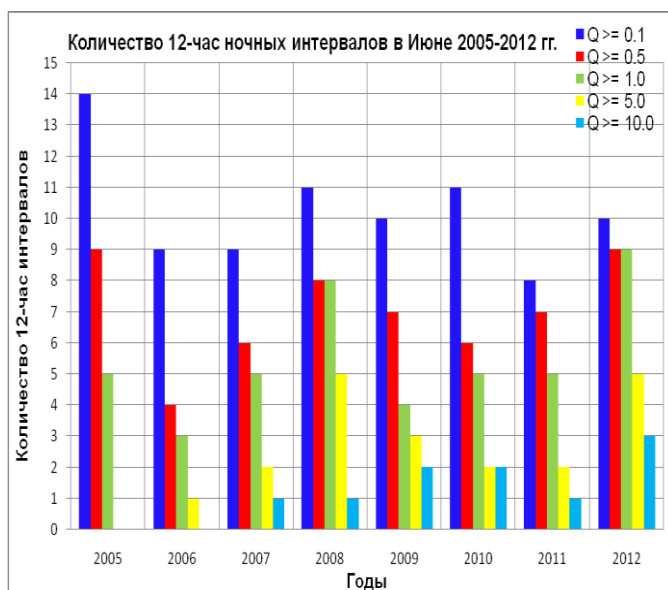
a



б



в



г

Рис. 6. Количество 12-часовых дневных (а, в) и ночных (б, г) интервалов с осадками в мае (а, б) и в июне (в, г) 2005–2012 гг.

Важной с точки зрения оценки облачных ресурсов на заданной территории является также информация о температуре верхней границы облачности. Как известно, максимальная температура, при которой в облаке генерируется количество ледяных частиц, достаточное для заметного влияния на процесс осадко-

образования, для йодистого серебра AgI, наиболее широко используемого для АВ на облака различных типов, составляет по данным разных авторов минус 4–6 °С [3]. В связи с этим были получены оценки вклада в слой осадков, выпадающих из облаков с температурой верхней границы меньше минус 5 °С. Анализ данных об облачности и осадках для Минеральных Вод показал, что в мае вклад осадков из облаков с такой температурой составляет в дневное время 78 %, а в ночное – 76 %. В июне вклад осадков из таких облаков составляет 61 и 71 % в дневное и ночное время, соответственно.

Таким образом, результаты исследований характеристик облачности и осадков позволяет сделать вывод, что данный регион располагает облачными ресурсами для проведения в мае-июне работ по АВ на облака с целью увеличения осадков для нужд сельского хозяйства.

3. Экономическая эффективность производственных работ по ИУО

Расчет экономической эффективности ИУО методами активных воздействий на территории Ставропольского края проводился с помощью полученные в разделах 2 и 3 моделей «урожай-осадки» для озимой пшеницы, картофеля и сахарной свеклы и характеристик облачности и осадков для этой территории.

Используя уравнения (1) и (2) нетрудно показать, что прирост урожайности ΔQ за счет дополнительно полученной воды ΔP составит при искусственном увеличении осадков в результате активных воздействий на облака:

$$\Delta Q = \sum_{i=1}^n b_i \Delta P_i \text{ и } \Delta Q = b \Delta P - \text{соответственно для моделей (1) и (2),}$$

где ΔP_i – дополнительные осадки, измеренные на станциях, входящих в регрессионное уравнение (1), дающее наименьшую ошибку прогноза урожайности Q по модели 1.

При занятой под сельхозкультуру площади S увеличение сбора урожая составит $\Delta V = \Delta Q * S$. Выручка от продажи дополнительно урожая, полученного благодаря ИУО в наиболее благоприятные с точки зрения роста растений месяцы, составит:

$$\Delta D = \Delta V * D = \Delta Q S D, \quad (3)$$

где D – закупочная цена сельхозкультуры.

В табл. 1–3 приведены результаты оценки экономической эффективности ИУО с учётом облачных ресурсов в предположении, что работы по АВ на облака выполняются в дневное время, т.е. будет использоваться самолетный метод, и увеличение осадков в мае-июне благодаря АВ составит 10 и 20 %, соответственно. Расчеты выполнены по данным о средних ценах и посевной площади сельхозкультур в период 2003–2011 гг. Следует отметить, что значения ΔQ_{\min} и ΔQ_{\max} в табл. 1–3 определялись для сезонов, в которые в мае-июне наблюдались минимальные и максимальные осадки на территории Ставропольского края.

Таблица 1

Экономическая эффективность ИУО для озимой пшеницы

Период	ΔQ_{\min} , ц/га	ΔQ_{\max} , ц/га	ΔV_{\min} , т	ΔV_{\max} , т	ΔD_{\min} , млн руб.	ΔD_{\max} , млн руб.	Модель
Увеличение осадков на 10 %							
Июнь	0,1	0,36	15 869	57 094	57	205	1
	0,14	0,31	21 859	49 198	79	177	2
Май –	0,28	0,83	44 362	130 877	160	471	1
Июнь	0,37	1,83	58 048	130 512	209	470	2
Увеличение осадков на 20 %							
Июнь	0,20	0,72	31 737	114 188	114	411	1
	0,28	0,62	43 718	98 397	157	354	2
Май –	0,56	1,66	88 724	261 754	319	942	1
Июнь	0,74	1,65	116 096	261 024	418	939	2

Таблица 2

Экономическая эффективность ИУО для картофеля

Период	ΔQ_{\min} , ц/га	ΔQ_{\max} , ц/га	ΔV_{\min} , т	ΔV_{\max} , т	ΔD_{\min} , млн руб.	ΔD_{\max} , млн руб.	Модель
Увеличение осадков на 10 %							
Май	0,69	2,08	1 929	5 840	16	47	1
	0,60	1,35	1 684	3 782	14	31	2
Май –	1,37	3,01	3 846	8 442	31	68	1
Июнь	1,13	2,55	3 185	7 161	26	58	2
Увеличение осадков на 20 %							
Май	1,37	4,16	3 859	11 679	31	94	1
	1,20	2,69	3 367	7 564	27	61	2
Май –	2,74	6,01	7 692	16 883	62	136	1
Июнь	2,27	5,11	6 370	14 322	51	116	2

Таблица 3

Экономическая эффективность ИУО для сахарной свеклы

Период	ΔQ_{\min} , ц/га	ΔQ_{\max} , ц/га	ΔV_{\min} , т	ΔV_{\max} , т	ΔD_{\min} , млн руб.	ΔD_{\max} , млн руб.	Модель
Увеличение осадков на 10 %							
Май	3,47	7,85	8 862	20 042	11	25	1
Май –	4,30	10,69	10 989	27 285	14	35	1
Июнь	6,10	12,28	15 581	31 347	20	40	2
Увеличение осадков на 20 %							
Май	6,94	15,70	17 725	40 084	22	51	1
Май –	8,61	21,37	21 978	54 570	28	69	1
Июнь	12,21	24,56	31 163	62 694	39	79	2

Для определения чистого дохода необходимо оценить расходы на выполнение работ по ИУО, проводимых с использованием самолетного метода, которые складываются из следующих затрат:

$$V_{\Sigma} = \sum (V_{\text{смл}} + V_{\text{реаг}} + V_{\text{спец}} + V_{\text{рл}} + V_{\text{метео}} + V_{\text{накл}} + W) N, \quad (4)$$

где $V_{\text{смл}}$ – затраты на выполнение авиационных работ, включая аренду самолета, расходы на ГСМ, аэродромные и аэронавигационные расходы; $V_{\text{реаг}}$ – затраты на реагенты (гранулированная углекислота, пиропатроны с йодидом серебра,

жидкий азот); $V_{\text{спец}}$ – заработная плата и командировочные расходы специалистов; $V_{\text{рл}}$ – затраты на обеспечение работ радиолокационной информацией; $V_{\text{метео}}$ – затраты на обеспечение работ метеорологической информацией; $V_{\text{накл}}$ – накладные расходы предприятия; W – прибыль; N – налог на добавленную стоимость (для работ, выполняемых на территории РФ).

Расчеты затрат проводились для случая выполнения работ по АВ на облака с использованием самолетного метода на территории Ставропольского края в мае-июне. В разделе 2 показано, что в мае и июне 7–8 случаев выпадения осадков в дневное время дают более 90% месячного дневного количества осадков. В связи с этим для проведения воздействий на облака в дневное время в мае–июне при использовании самолётов типа «Гжель» и Ан-30 в среднем необходимо отработать 16 дней (по 8 дней ежемесячно). В табл. 4 приведены результаты расчетов затрат при проведении работ по ИУО с использованием двух типов самолетов.

Таблица 4

Период работ по ИУО	Затраты, млн руб.	
	М-101Т «Гжель»	Ан-30
1 месяц (май или июнь)	18,5	30,0
2 месяца (май и июнь)	33,0	55,0

Сравнение приведенных в табл. 1–3 результатов расчётов экономической эффективности работ по ИУО на примере трёх сельскохозяйственных культур, выращиваемых на территории Ставропольского края, с приведенными в таблице 4 оценками расходов на проведение производственных работ по АВ на облака самолетным методом позволяет сделать вывод, что чистая прибыль работ по ИУО может составить:

– для озимой пшеницы при 10 %-ном увеличении осадков от 28,8 до 184,2 млн руб. в июне и от 109 до 438 млн руб. в мае–июне для разных типов используемых самолётов;

– для картофеля при 20%-ном увеличении осадков – до 64,5 млн руб. в мае и до 86,1 млн руб. в мае-июне, при этом в сезоны с минимальными облачными ресурсами применение самолётов типа Ан-30 оказывается нерентабельным;

– для сахарной свёклы при 20 %-ном увеличении осадков от 4,0 до 32,5 млн руб. в мае и до 48,6 млн руб. в мае-июне, при этом в сезоны с минимальными облачными ресурсами применение самолетов типа Ан-30 в мае и Ан-28, «Гжель» и Ан-30 в мае–июне оказывается нерентабельным.

Выводы

1. Таким образом, проведенный анализ показывает, что при дополнительном количестве выпадающих осадков выше 10–20 % от месячной нормы в мае-июне прирост урожайности таких культур как озимая пшеница, картофель и сахарная свекла позволяет рассматривать проведение производственных работ по искусственному увеличению осадков с использованием самолётного метода перспективным.

2. Разработанный алгоритм оценки экономической эффективности производственных работ по искусственному увеличению атмосферных осадков для нужд сельского хозяйства может быть использован при планировании этих работ в различных сельскохозяйственных регионах.

Литература

1. *Дмитриенко В.П.* Оценка влияния температуры воздуха и осадков на формирование урожая основных зерновых культур. – Л.: Гидрометеоздат, 1976. – 49 с.
2. *Дрейпер Н., Смит Г.* Прикладной регрессионный анализ. Т. 1. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 366 с.
3. *Колосков Б.П., Корнеев В.П., Шукин Г.Г.* Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов. – СПб., 2012. – 341 с.
4. *Сванидзе Г.Г., Бегалишвили Н.А., Бериташвили Б.Ш.* О физической и экономической эффективности работ по искусственному увеличению осадков в Закавказье. // Доклады V Всесоюзного совещания «Планирование и оценка эффективности работ по искусственному увеличению осадков». – Ставрополь, 1990, с. 80-90.
5. *Себер Дж.* Линейный регрессионный анализ. – М.: Мир, 1980. – 456 с.
6. *Уланова Е.С., Забелин В.Н.* Методы корреляционного и регрессионного анализа в агрометеорологии. – Л.: Гидрометеоздат, 1990. – 207 с.
7. *Экба Я.А., Каплан Л.Г., Закинян Р.Г.* Физико-статистические модели урожай осадки для засушливых и влагообеспеченных районов Ставропольского края // Докл. V Всесоюз. совещания «Планирование и оценка эффективности работ по искусственному увеличению осадков». – Ставрополь, 1990, с. 64-70.
8. *Экба Я.А., Каплан Л.Г., Закинян Р.Г.* Экономическая эффективность работ по искусственному увеличению осадков в Ставропольском крае. // Доклады V Всесоюзного совещания «Планирование и оценка эффективности работ по искусственному увеличению осадков». – Ставрополь, 1990, с. 77-80.