

Научная статья

УДК 519-7

EDN DZKBYX

DOI 10.17150/2713-1734.2024.6(4).465-477



**И.М. Колокольцева**

*Иркутский государственный аграрный  
университет им. А.А. Ежевского,  
п. Молодежный, Иркутский район, Российская Федерация*

**Я.М. Иваньо**

*Иркутский государственный аграрный  
университет им. А.А. Ежевского,  
п. Молодежный, Иркутский район, Российская Федерация*

### **Модели изменчивости численности саранчовых вредителей**

**Аннотация.** В статье приведены результаты построения факторных моделей, характеризующих связи численности саранчовых вредителей от метеорологических факторов (суточной температуры воздуха и суточных сумм осадков) с учетом природно-климатических особенностей территории на примере муниципальных районов Иркутской области. Предложены два варианта решения задачи: построение регрессионного выражения зависимости результативного признака от средних температур воздуха и сумм осадков за июнь; определение регрессионного выражения с расчетным периодом, в котором влияние факторов на результативный признак является максимальным. Для оценки неблагоприятных и благоприятных факторов, влияющих на численность саранчовых вредителей, предложены алгоритмы с использованием метода Монте-Карло. Выделена и решена задача вероятностной оценки редкой численности саранчовых для определения высоких потерь урожайности сельскохозяйственных культур. Модели и алгоритмы апробированы на материалах муниципальных районов, расположенных в разных агроландшафтных районах Иркутской области.

**Ключевые слова.** Факторная модель, алгоритм, саранчовые вредители, температура воздуха, осадки, метод статистических испытаний, урожайность.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 24-21-00502.

**Информация о статье.** Дата поступления: 26 августа 2024 г.; дата принятия к публикации: 16 декабря 2024 г.; дата онлайн-размещения: 24 декабря 2024 г.

**I.M. Kolokoltseva***Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky,  
Molodezhny, Irkutsk District, Russian Federation***Ya.M. Ivanyo***Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky,  
Molodezhny, Irkutsk District, Russian Federation*

## Models of Variability of Locust Pest Number

**Abstract.** The article presents the results of constructing factor models characterizing the relationship between the number of locust pests and meteorological factors (daily air temperature and daily precipitation amounts), taking into account the natural and climatic characteristics of the territory on the example of municipal districts of the Irkutsk region. Two solutions to the problem are proposed: the construction of a regression expression of the dependence of the effective feature on average air temperatures and precipitation amounts for June; definition of a regression expression with a calculation period in which the influence of factors on the effective feature is maximum. Algorithms using the Monte Carlo method are proposed to assess the adverse and favorable factors affecting the number of locust pests. The problem of probabilistic estimation of rare locust populations to determine high crop yield losses has been identified and solved. The models and algorithms have been tested on the materials of municipal districts located in different agro-landscape areas of the Irkutsk region.

**Keywords.** Factor model, algorithm, locust pests, air temperature, precipitation, statistical test method, yield.

**Financing.** This research was financially supported by the project of № 24-21-00502.

**Article info.** Received 26 August, 2024; Accepted 16 December, 2024; Available online 24 December, 2024.

## Введение

Прогнозирование численности вредителей имеет большое значение для защиты сельскохозяйственных растений, так как помогает заранее сконцентрировать внимание на определенных видах вредителей и посевах.

Саранчовые — одни из наиболее экономически значимых вредителей в России. Они способны наносить существенный урон сельскому хозяйству благодаря многоядности и быстрому нарастанию численности. Именно поэтому мониторинг популяций саранчовых играет первоочередную роль в деле борьбы с этим особо опасным вредителем [1–3]. От полноты и своевременности информации о распространении вредителя зависит возможность принятия правильных решений и мер по обеспечению оптимальной фитосанитарной обстановки для получения стабильных урожаев сельскохозяйственных культур и уменьшения рисков [4–6].

В Иркутской области распространено 17 видов нестадных саранчовых [7–13]. По данным ФГБУ «Россельхозцентр» по Иркутской области в 2023 г. 50 % обследованной площади сель-

хозугодий заселено саранчовыми. Истребительные мероприятия против саранчовых вредителей проведены на площади 8,49 тыс. га.

Определение математических моделей, характеризующих изменчивость численности вредителей, актуально, т.к. позволяет предсказывать их появление и масштабы, планировать мероприятия по защите растений, оптимизировать применение пестицидов, принимать решения об использовании агротехнических приемов и других сторонах производства, минимизирующих ущерб от вредителей. Одними из таких моделей являются факторные, для которых оцениваются связи между численностью саранчовых вредителей и метеорологическими факторами — температурой воздуха и осадков за вегетационный период. При этом с помощью статистической обработки данных определяются зависимости результативного признака от метеорологических характеристик и периоды наибольшего влияния факторов на численность саранчовых. При моделировании производственно-экономических характеристик, связанных с оценкой риска, используют метод статистических испытаний [14–18].

*Целью работы* является разработка факторных моделей изменчивости численности саранчовых вредителей, оценка периода наибольшего влияния метеорологических факторов на результативный признак на основе предложенного алгоритма и моделирование максимально возможных потерь от вредителей с учетом природно-климатических особенностей рассматриваемых территорий для прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур.

Для достижения цели решались следующие *задачи*:

- создать факторные модели зависимости численности саранчовых от температуры воздуха и осадков за теплый период с использованием алгоритма выделения периодов с максимальным влиянием факторов на результативный признак;
- определить наиболее вероятные потери урожайности сельскохозяйственных культур от вредителя.

### **Материалы и методы**

В работе использован многофакторный анализ для определения зависимости численности личинок саранчовых от суточных температур воздуха и сумм осадков теплого сезона за многолетний период по данным 2017–2023 гг. для муниципальных районов Иркутской области на основе информации:

- о вредителях сельскохозяйственных культур за 2017–2023 гг. [7–13];
- метеорологических данных ФГБУ «Иркутское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды».

В дополнение к этому с помощью регрессионного анализа определены факторные зависимости влияния саранчовых вредителей на урожайность сельскохозяйственных культур.

Для оценки благоприятных и неблагоприятных факторов влияния саранчовых вредителей на урожайность разработан алгоритм с использованием метода Монте-Карло.

### Основные результаты

Алгоритм построения регрессионных выражений, характеризующих связь численности саранчовых от метеорологических факторов, состоит из следующих операций. На первом этапе определены матрицы коэффициентов корреляции, позволившие оценить тесноту связи между численностью личинок саранчовых вредителей и среднесуточными температуры воздуха и суммами осадков за теплый сезон (с мая по август) для разных временных отрезков (май–август, месяц). Связи строятся на основе многолетних данных.

Влияние климатических факторов оценивалось на примере разных районов Иркутской области, относящихся к разным агроландшафтным районам сельскохозяйственной территории Предбайкалья [19].

Анализ полученных данных показал, что наиболее существенное влияние на популяцию саранчовых оказывают средние температуры воздуха и суммарные осадки за июнь месяц.

Выявлена положительная связь между результативным признаком и температурой воздуха июня  $R(0,52 \dots 0,90)$ , и отрицательная — с суммарным количеством осадков того же месяца  $(-0,80 \dots -0,38)$ .

На основании корреляционного анализа проведен регрессионный анализ для определения зависимости между численностью личинок саранчовых  $y_i$  (экз./м<sup>2</sup>) и факторами, в котором  $T_i$  — средняя месячная температура воздуха в пределах вегетационного периода (с мая по август), а  $x_i$  — сумма осадков за этот же месяц.

Для шести районов из восьми получены значимые регрессионные выражения [20], в которых основным фактором является средняя суточная температура за июнь. Вместе с тем в Тайшетском районе основным фактором являются суммы осадков за июль, хотя и для июня имеет место удовлетворительная связь. Для Иркутского и Черемховского районов корреляционные связи не устойчивы (табл. 1) [21].

Определение значимых регрессионных уравнений предполагает наличие оптимальных суточных интервалов в рамках первых месяцев теплого периода, для которых можно получить улучшенные регрессионные выражения.

Алгоритм определения регрессионных уравнений с интервалами наибольшего влияния температур воздуха и сумм осадков на результативный признак можно описать следующим образом.

Сначала рассматривается влияние на численность саранчовых вредителей средних температур воздуха и сумм осадков за десятидневный период, начинающийся с 1 мая. Для оценки тесноты связи использован коэффициент детерминации. Затем определяется влияние

факторов за такой же период со сдвигом начальной даты на одни сутки (в конкретном случае — со 2 по 11 мая). Указанные выше операции продолжаются вплоть до 30 июня включительно. Затем период усреднения температур и суммирования осадков увеличивается на 1 шаг, и оценивается точность зависимости между результативным признаком и факторами ( $R^2$ ) за 11 суток. Подобные операции повторяются для 12, 13, ..., 30 суток. Из множества полученных уравнений регрессии выбираются лучшие выражения при обязательном соблюдении условия, что коэффициент детерминации превышает 0,50.

Таблица 1

**Результаты регрессионного анализа зависимости численности саранчовых от температур воздуха и сумм осадков за июнь в муниципальных районах Иркутской области, 2017–2023 гг. [21]**

№ п.п.	Район	Уравнение регрессии	$R^2$	F-критерий Фишера	Уровень значимости уравнения	t-статистика
1	Качугский	$y_t = 16,1T_t - 241,3$	0,80	20,00	0,0066	4,47
2	Тайшетский	$^*y_t = 3,77 - 0,027x_t$	0,75	12,50	0,0239	–3,54
3	Заларинский	$y_t = 12,08T_t - 183,3$	0,56	6,41	0,0523	2,53
4	Черемховский	$y_t = 6,25T_t - 84,73$	0,36	2,83	0,1534	1,68
5	Иркутский	$y_t = 5,29T_t - 80,5$	0,33	2,51	0,1740	1,59
6	Боханский	$y_t = 6,17T_t - 96,1$	0,81	21,8	0,0055	4,67
7	Нукутский	$y_t = 22,8 - 0,142x_t$	0,65	9,31	0,0284	–3,05
8	Эхирит-Булагатский	$y_t = -120,8 + 7,62T_t$	0,67	8,29	0,0450	2,88

*Примечание:*

\* Численность личинок саранчовых связана с осадками за июль

Начальные и конечные даты суммирования и усреднения предложены с учетом периода отрождения личинок, который в Иркутской области, начинается в мае. Однако прохладная погода с заморозками и осадками в этот период может замедлить этот процесс до месяца. Учитывая, что личиночный период развития саранчовых длится 30–60 дней и включает 4-5 возрастов [3], определена конечная дата — 30 июня [21]. При этом очевидно, что на юге региона этот период начнется раньше и будет короче, чем на севере, что предполагает сдвиг окончания периода на июль.

Предложенный алгоритм реализован для определения зависимости изменчивости численности саранчовых вредителей от метеорологических факторов на примере восьми районов Иркутской области, в разных природно-климатических условиях [19].

Результаты моделирования с интервалами 10, 20 и 30 суток, в пределах которых определялись средние температуры воздуха и осадки, приведены в табл. 2.

Обращает на себя внимание тот факт, что с увеличением временного интервала усреднения возрастает влияние температуры воздуха на численность саранчовых и несущественным становится влияние суточных осадков. Например, для интервала усреднения факторов, соответствующего 10 суткам, для пяти районов результативный признак связан с температурами воздуха и осадками. Что касается периода не менее 20 суток, то для него основным фактором, влияющим на численность саранчовых, является усредненная температура воздуха. Из приведенных выражений предлагается использовать уравнения регрессии с периодом усреднения метеорологических факторов, который равен 20 суткам. Для них уровень значимости полученных выражений не превышает 0,03. Исключение составляет Черемховский район, для которого значимым является выражение с интервалом усреднения факторов 10 суток.

Интегрированная система защиты растений предполагает отказ от стратегии уничтожения вредителей и применения превентивных инсектицидных обработок в тех случаях, когда вредители отсутствуют или их численность, не превышает экономического порога вредоносности (ЭПВ).

ЭПВ можно рассматривать и как элемент экологического нормирования, направленного на ограничение экологических рисков, связанных с использованием пестицидов [22]. Вместе с тем переоценка вредоносности объекта приводит к необоснованным затратам на защитные мероприятия против него, а недооценка — к существенным потерям урожая [23].

Таблица 2

**Регрессионные зависимости численности саранчовых вредителей от метеорологических факторов для разных районов Иркутской области**

Период	Кол-во дней	$R^2$	Выражение	$F$	Значимость $F$	$t$ -статистика
<i>Качугский район</i>						
25–3 июня	10	0,94	$y_t = -158,9 + 14,8T_t + 1,1x_t$	29,65	0,0040	7,4; 2,6
23–11 июня	20	0,85	$y_t = -190,5 + 16,6T_t$	28,93	0,0030	5,4
1–30 июня	30	0,80	$y_t = -241,3 + 16,1T_t$	20,00	0,0066	4,47
<i>Иркутский район</i>						
17–26 июня	10	0,87	$y_t = -129,1 + 7,0T_t + 0,5x_t$	13,98	0,0157	5,3; 3,3
7–26 июня	20	0,67	$y_t = -100,9 + 6,3T_t$	10,13	0,0245	3,2
1–30 июня	30	0,33	$y_t = -80,5 + 5,3T_t$	2,51	0,1737	1,6
<i>Заларинский район</i>						
17–26 июня	10	0,95	$y_t = -254,3 + 14,2T_t + 0,4x_t$	35,71	0,0028	7,8; 3,5
7–26 июня	20	0,75	$y_t = -180,0 + 11,3T_t$	15,19	0,0114	3,9
1–30 июня	30	0,56	$y_t = -183,3 + 12,1T_t$	6,41	0,0523	2,53

Окончание табл. 2

Период	Кол-во дней	$R^2$	Выражение	$F$	Значимость $F$	$t$ -статистика
<i>Черемховский район</i>						
23 мая — 1 июня	10	0,70	$y_t = -57,2 + 5,2T + 0,8x_t$	4,68	0,0897	3,0; 2,4
11–30 июня	20	0,45	$y_t = -49,4 + 3,9T_t$	4,13	0,0979	2,0
1–30 июня	30	0,36	$y_t = -84,7 + 6,3T_t$	2,83	0,1534	1,7
<i>Боханский район</i>						
22–31 мая	10	0,92	$y_t = -45,1 + 3,9T_t + 0,5x_t$	21,63	0,0072	6,4; 4,5
24 мая — 12 июня	20	0,74	$y_t = -80,5 + 6,5T_t$	14,53	0,0125	3,8
1–30 июня	30	0,81	$y_t = -96,1 + 6,2T_t$	21,80	0,0055	4,67
<i>Нукутский район</i>						
16–25 июня	10	0,84	$y_t = -69,1 + 4,3T_t$	26,92	0,0035	5,2
7–26 июня	20	0,62	$y_t = -61,7 + 4,1T_t$	8,30	0,0345	2,9
1–30 июня	30	0,65	$y_t = 22,84 - 0,14x_t$	9,31	0,0284	3,0
<i>Эхирит-Булагатский район</i>						
16–25 июня	10	0,73	$y_t = -146,1 + 8,6T_t$	10,60	0,0311	3,3
7–26 июня	20	0,84	$y_t = -97,3 + 6,1T_t$	21,26	0,0100	4,6
1–30 июня	30	0,67	$y_t = -120,8 + 7,6T_t$	8,29	0,0450	2,9

Поэтому в данном исследовании определены метеорологические условия, при которых  $y_t$  (численность саранчовых вредителей) не превысит экономического порога вредоносности для определения целесообразности проведения защитных мероприятий. Для этого приведены результаты вычислений по данным муниципальных районов региона (табл. 3).

Таблица 3

**Интервалы температур воздуха и осадков, при сочетании которых соблюдается экономический порог вредоносности в муниципальных районах**

Район	Температура, °С	Осадки, мм
Иркутский	15,0...19,4	1...62
Качугский	9,8...11,2	0...16
Заларинский	16,8...18,4	6...55
Черемховский	7,8...12,4	0...33
Боханский	8,6...13,8	0...39
Нукутский	17,4...18,2	—
Эхирит-Булагатский	17,6...18,1	—

Для определения температур воздуха и сумм осадков, при которых численность саранчовых вредителей не превысит порога экономической вредоносности, воспользуемся полученными факторными моделями (табл. 2).



Для этого методом Монте-Карло моделируются  $n$  раз случайные температуры воздуха и осадки в заданном интервале, который для каждого муниципального района определен исходя из многолетних наблюдений за метеорологическими факторами. Затем эти случайные оценки температуры воздуха и сумм осадков подставляются в полученные факторные модели для каждого района. Далее из всех результатов выделяются значения численности саранчовых, которые находятся ниже экономического порога вредоносности (ниже 10 экз./м<sup>2</sup>). Соответствующие им значения температуры воздуха и осадков обобщаются в виде вероятных интервалов, при которых результативный признак находится ниже ЭПВ. Применение такого алгоритма имеет смысл для многофакторной модели. В табл. 3 приведены вероятные сочетания температуры воздуха и осадков.

В разные годы имели место вспышки численности саранчовых. На заброшенных землях, пастбищах и некоторых территориях хозяйств, при отсутствии мер защиты растений от вредителей, отмечается их повышенная концентрация. На протяжении многолетнего периода наблюдений в регионе регистрировалась высокая плотность популяции саранчовых. В худших случаях зарегистрировано более 300 особей на квадратный метр. В частности, в Иркутском районе этот показатель составлял 120 экз./м<sup>2</sup>. Исследования высокой плотности популяции саранчовых на основе историко-архивных данных можно использовать для оценки наиболее вероятных ущербов от влияния вредителей. Для этого, аналогично, по предложенному выше алгоритму, установлены метеорологические факторы, влияющие на численность саранчовых вредителей согласно превышению ЭПВ.

Отдельно выделен алгоритм моделирования редкой численности саранчовых в зависимости от температуры воздуха и осадков. Для регрессионных выражений  $y_i = a_0 + a_1 T_i$  необходимо выполнить следующие операции.

Во-первых, определить температуру воздуха, при которой  $y_i > \text{ЭПВ}$  по формуле  $T_i = (y_i - a_0) / a_1$ .

Во-вторых, сформировать ряд средних температур за 20 суток в соответствии с датами начала и завершения интервала, и построить эмпирическую функцию распределения с аналитическим законом.

В-третьих, по максимальному значению температуры за многолетний период определить маловероятное значение численности саранчовых. Вероятность такого события определяется по аналитической и эмпирической функции распределения температуры воздуха.

Возможен вариант моделирования высоких значений температур с оценкой их вероятностей методом статистических испытаний за заданный многолетний период с выделением наибольшего значения характеристики тепла.



Приведенный алгоритм реализован для Иркутского района с использованием выражения таблицы 2 ( $y_i = -100,9 + 6,32T$ ). Получена максимальная численность саранчовых, равная 24,8 экз./м<sup>2</sup> по условиям 2000 г., когда среднесуточная температура двадцатидневного периода составила максимальное значение с 1971 г. 19,9°C. Вероятность проявления такого редкого события в соответствии с законом распределения Пирсона III типа составляет 0,0345, а согласно эмпирической функции распределения — 0,0192.

Следует иметь в виду, что результаты, приведенные в работе, получены на незначительных многолетних объемах данных. При этом приведенные алгоритмы предполагают постоянное дополнение исходных данных температурами воздуха и осадками, а также численностью личинок саранчовых вредителей для адекватного моделирования.

### Заключение

Численность саранчовых зависит от температуры воздуха и сумм осадков за июнь, что подтверждено для территорий Иркутской области с разными природно-климатическими особенностями.

Описан и реализован алгоритм построения регрессионных выражений с определением периода метеорологических факторов, в наибольшей степени влияющих на численность саранчовых.

Приведен алгоритм, позволяющий с помощью метода статистических испытаний определять неблагоприятные и благоприятные метеорологические условия для развития численности саранчовых, а также оценивать наибольшее влияние температуры воздуха и сумм осадков в начале вегетационного периода на развитие вредителей и потери урожайности сельскохозяйственных культур.

Предложен алгоритм моделирования редкой численности саранчовых вредителей на основе факторных моделей.

Полученные модели и алгоритмы реализованы для восьми районов Иркутской области, расположенных в разных агроландшафтных районах. Они позволяют предсказывать разные ситуации развития численности саранчовых вредителей для определения мер по борьбе ними.

Между тем необходимы дальнейшие исследования для улучшения процессов моделирования.

### Список использованной литературы

1. Темирлиева З.С. Продолжительность развития личинок саранчовых Карачаево-Черкесии / З.С. Темирлиева. — EDN ZMZPRF // Юг России: экология, развитие. — 2017. — Т. 12, № 3. — С. 166–170.
2. Федорова Г.Н. Методы мониторинга нестадных саранчовых / Г.Н. Федорова. — EDN LPWRGX // Защита и карантин растений. — 2008. — № 8. — С. 39.

3. Фролов А.Н. Закономерности динамики численности вредителей и фитосанитарный прогноз / А.Н. Фролов. — DOI 10.31993/2308-6459-2019-3(101)-4-33. — EDN XWGBBJ // Вестник защиты растений. — 2019. — № 3 (101). — С. 4–33.
4. Барсукова М.Н. О некоторых моделях оптимизации производства растениеводческой продукции в условиях биологических рисков / М.Н. Барсукова, Я.М. Иванько, И.М. Колокольцева. — DOI 10.12737/2219-0767-2022-15-4-17-23. — EDN NBGJHS // Моделирование систем и процессов. — 2022. — Т. 15, № 4. — С. 17–23.
5. Иванько Я.М. Моделирование аграрного производства в условиях влияния климатических, экологических и биологических событий / Я.М. Иванько, И.М. Колокольцева, С.А. Петрова. — DOI 10.17150/2713-1734.2023.5(4).442-456. — EDN XPFPQB // System Analysis and Mathematical Modeling. — 2023. — Т. 5, № 4. — С. 442–456.
6. Иванько Я.М. О некоторых моделях планирования производства аграрной продукции в условиях биологических рисков / Я.М. Иванько, И.М. Колокольцева, С.А. Петрова. — EDN PJAJIQ // Актуальные вопросы инженерно-технического и технологического обеспечения АПК : материалы X Нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Молодёжный, 06-08 окт. 2022 г. — Молодёжный, 2022. — С. 274–284.
7. Обзор фитосанитарного состояния посевов сельскохозяйственных культур в Российской Федерации в 2017 году и прогноз развития вредных объектов в 2018 году / сост. Д.Н. Говоров, А.В. Живых, Е.С. Новоселов [и др.]. — Москва, 2018. — 544 с. — EDN NTMTRT.
8. Обзор фитосанитарного состояния посевов сельскохозяйственных культур в Российской Федерации в 2018 году и прогноз развития вредных объектов в 2019 году / сост. Д.Н. Говоров, А.В. Живых, Е.С. Новоселов [и др.]. — Москва, 2019. — 523 с. — EDN ZTBOVV.
9. Обзор фитосанитарного состояния посевов сельскохозяйственных культур в Российской Федерации в 2019 году и прогноз развития вредных объектов в 2020 году / сост. Д.Н. Говоров, А.В. Живых, Е.С. Новоселов [и др.]. — Москва, 2020. — 512 с.
10. Обзор фитосанитарного состояния посевов сельскохозяйственных культур в Российской Федерации в 2020 году и прогноз развития вредных объектов в 2021 году / сост. Д.Н. Говоров, А.В. Живых, Е.С. Новоселов [и др.]. — Москва, 2021. — 512 с.
11. Обзор фитосанитарного состояния посевов сельскохозяйственных культур в Российской Федерации в 2021 году и прогноз развития вредных объектов в 2022 году / сост. Д.Н. Говоров, А.В. Живых, Е.С. Новоселов [и др.]. — Москва, 2022. — 476 с.
12. Обзор фитосанитарного состояния посевов сельскохозяйственных культур в Российской Федерации в 2022 году и прогноз развития вредных объектов в 2023 году / сост. Д.Н. Говоров, А.В. Живых, Е.С. Новоселов [и др.]. — Москва, 2023. — 559 с.
13. Обзор фитосанитарного состояния посевов сельскохозяйственных культур в Российской Федерации в 2023 году и прогноз развития вредных объектов в 2024 году / сост. Д.Н. Говоров, А.В. Живых, А.А. Шабельникова [и др.]. — Москва, 2024. — 1281 с. — URL: <https://rosselhocenter.ru/upload/iblock/2f5/5k7pj112muj4l1l6x7itquxc1vlg61ph/2023-2024.pdf>.
14. Buzina T.S. Method of Statistical Tests in Solving Problems of Food Production Management / T.S. Buzina, A.Yu. Belyakova, Ya.M. Ivanyo. — DOI 10.1088/1755-1315/839/3/032051. — EDN KYPGSP // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Krasnoyarsk, 16-19 July 2021. — Krasnoyarsk, 2021. — P. 32051.
15. Robert C.P. Monte Carlo Statistical Methods / C.P. Robert, G. Casella. — New York : Springer, 2004. — 667 p.

16. Иваньо Я.М. Метод статистических испытаний в моделировании урожайности зерновых культур в зависимости от метеорологических факторов / Я.М. Иваньо, С.А. Петрова. — EDN PBMТMT // Актуальные вопросы инженерно-технического и технологического обеспечения АПК : материалы VIII Нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Иркутск, 26-27 сент. 2019 г. — Иркутск, 2019. — С. 174–179.
17. Фалин Г.И. Анализ рисков с помощью метода Монте-Карло. / Г.И. Фалин. — EDN YGWZIT // Управление риском. — 2017. — № 1. — С. 3–19.
18. Ферстер Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа. Руководство для экономистов / Э. Ферстер, Б. Ренц; пер. с нем. и предисл. В.М. Ивановой. — Москва : Финансы и статистика, 1983. — 304 с.
19. Солодун В.И. Агроландшафтное районирование Иркутской области : учеб.-метод. пособие / В.И. Солодун. — Иркутск : Изд-во ИрГАУ им. А.А. Ежовского, 2015. — 157 с.
20. Колокольцева И.М. Влияние метеорологических факторов на разные уровни урожайности сельскохозяйственных культур / И.М. Колокольцева, Я.М. Иваньо. — EDN TBPZDA // Научные исследования и разработки к внедрению в АПК : материалы междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Молодежный, 16–17 марта 2023 г. — Молодежный, 2023. — С. 520–527.
21. Колокольцева И.М. Оценка влияния метеорологических факторов на численность саранчовых / И.М. Колокольцева, Я.М. Иваньо. — EDN QOZAOM // Научные исследования и разработки к внедрению в АПК : материалы междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Молодежный, 14–15 марта 2024 г. — Молодежный, 2024. — С. 105–110.
22. Экологизация химической защиты растений от вредителей / К.С. Артохин, П.К. Игнатова, Е.Н. Терсков, С.И. Колесников. — EDN QAKHQF // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. — 2013. — № 2 (174). — С. 48–52.
23. Танский В.И. Биологические основы вредоносности насекомых / В.И. Танский. — Москва : Агропромиздат, 1988. — 180 с.

## References

1. Temirlieva Z.S. Duration of Locust Larvae Development Territory of Karachay-Cherkesia. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie = South of Russia: Ecology, Development*, 2017, vol. 12, no. 3, pp. 166–170. (In Russian). EDN: ZMZPRF.
2. Fedorova G.N. Methods of Monitoring Grasshoppers. *Zashchita i karantin rastenii = Plant Protection and Quarantine*, 2008, no. 8, pp. 39. (In Russian). EDN: LPWRGX.
3. Frolov A.N. Patterns of Pest Population Dynamics and Phytosanitary Forecast. *Vestnik zashchity rastenii = Plant Protection News*, 2019, no. 3, pp. 4–33. (In Russian). EDN: XWGBBJ. DOI: 10.31993/2308-6459-2019-3(101)-4-33.
4. Barsukova M.N, Ivano Ya.M., Kolokolceva I.M. On Some Models of Optimization of Crop Production under Conditions of Biological Risks. *Modelirovanie sistem i protsessov = Modeling of Systems and Processes*, 2022, vol. 15, no. 4, pp. 17–23. (In Russian). EDN: NBGJHS. DOI: 10.12737/2219-0767-2022-15-4-17-23.
5. Ivanyo Ya.M., Kolokoltseva I.M., Petrova S.A. Simulation of Agricultural Production under the Influence of Climatic, Environmental, and Biological Events. *System Analysis and Mathematical Modeling*, 2023, vol. 5, no. 4, pp. 442–456. (In Russian). EDN: XPFPQB. DOI: 10.17150/2713-1734.2023.5(4).442-456.
6. Ivanyo Ya.M., Kolokoltseva I.M., Petrova S.A. On Some Planning Models of Agricultural Production under the Conditions of Biological Risks. *Topical Issues of Engineering and Technological Support of the Agro-industrial Complex. Materials of the X National Scientific and Practical Conference with the International Participation, Molodezhny, October 6–8, 2022*. Molodezhny, 2022, pp. 274–284. (In Russian). EDN: PJAJIQ

7. Govorov D.N., Zhiviykh A.V., Novoselov E.S. [et al.]. *Review of the Phytosanitary Condition of Agricultural Crops in the Russian Federation in 2017 and Forecast of the Development of Harmful Objects in 2018*. Moscow, 2018. 544 p. EDN: NTMTRT.
8. Govorov D.N., Zhiviykh A.V., Novoselov E.S. [et al.]. *Review of the Phytosanitary Condition of Agricultural Crops in the Russian Federation in 2018 and Forecast of the Development of Harmful Objects in 2019*. Moscow, 2019. 523 p. EDN: ZTBOVV.
9. Govorov D.N., Zhiviykh A.V., Novoselov E.S. [et al.]. *Review of the Phytosanitary Condition of Agricultural Crops in the Russian Federation in 2019 and Forecast of the Development of Harmful Objects in 2020*. Moscow, 2020. 512 p.
10. Govorov D.N., Zhiviykh A.V., Novoselov E.S. [et al.]. *Review of the Phytosanitary Condition of Agricultural Crops in the Russian Federation in 2020 and Forecast of the Development of Harmful Objects in 2021*. Moscow, 2021. 512 p.
11. Govorov D.N., Zhiviykh A.V., Novoselov E.S. [et al.]. *Review of the Phytosanitary Condition of Agricultural Crops in the Russian Federation in 2021 and Forecast of the Development of Harmful Objects in 2022*. Moscow, 2022. 476 p.
12. Govorov D.N., Zhiviykh A.V., Novoselov E.S. [et al.]. *Review of the Phytosanitary Condition of Agricultural Crops in the Russian Federation in 2022 and Forecast of the Development of Harmful Objects in 2023*. Moscow, 2023. 559 p.
13. Govorov D.N., Zhiviykh A.V., Shabel'nikova A.A. [et al.]. *Review of the Phytosanitary Condition of Agricultural Crops in the Russian Federation in 2023 and Forecast of the Development of Harmful Objects in 2024*. Moscow, 2024. 1281 p. Available at: <https://rosselhoccenter.ru/upload/iblock/2f5/5k7pj112muj4l1l6x7itqux-clvlg6lph/2023-2024.pdf>.
14. Buzina T.S., Belyakova A.Yu., Ivanyo Ya.M. Method of Statistical Tests in Solving Problems of Food Production Management. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Krasnoyarsk, July 16-19, 2021. Krasnoyarsk, 2021, pp. 32051. EDN: KYPGSP. DOI: 10.1088/1755-1315/839/3/032051.
15. Robert C.P., Casella G. *Monte Carlo Statistical Methods*. New York, Springer, 2004. 667 p.
16. Ivanyo Ya.M., Petrova S.A. The Method of Statistical Tests in Modeling Crop Yields Depending on Meteorological Factors. *Topical Issues of Engineering and Technological Support of the Agro-Industrial Complex. Materials of the X National Scientific and Practical Conference with the International Participation*, Irkutsk, September 26-27, 2019. Irkutsk, 2019, pp. 174–179. (In Russian). EDN: PBMTMT.
17. Falin G.I. Risk Analysis Using the Monte Carlo Method. *Upravlenie riskom = Risk Management*, 2017, no. 1, pp. 3–19. (In Russian). EDN: YGWZIT.
18. Forster E., Ronz B. *Methoden der Korrelations — und Regressionsanalyse*. Berlin, 1979. (Russ. ed.: Forster E., Ronz B. *Methods of Correlation and Regression Analysis*. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1983. 304 p.).
19. Solodun V.I. *Agro-landscape zoning of the Irkutsk region*. Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Yezhevsky Publ., 2015. 157 p.
20. Kolokoltseva I.M., Ivanyo Ya.M. Influence of Meteorological Factors on Different Levels of Crop Yield. *Scientific Research and Development for Implementation in Agro-Industrial Complex. Materials of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Molodezhnyi, March 16-17, 2023*. Molodezhnyi, 2023, pp. 520–527. (In Russian). EDN: TBPZDA.
21. Kolokoltseva I.M., Ivanyo Ya.M. Assessment of the Influence of Meteorological Factors on the Number of Locusts. *Scientific Research and Development for Implementation in Agro-Industrial Complex. Materials of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Molodezhnyi, March 14-15, 2024*. Molodezhnyi, 2024, pp. 105–110. (In Russian). EDN: QOZAOM.
22. Artokhin K.S., Ignatova P.K., Terskov E.N., Kolesnikov S.I. Greening of the Chemical Protection of Plants from Pests. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii*.

*Severo-Kavkazskii region. Seriya: Estestvennye nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences*, 2013, no. 2, pp. 48–52. (In Russian). EDN: QAKHQF.

23. Tanskii V.I. *Biological Basis of Insect Harmfulness*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1988. 180 p.

### Информация об авторах

**Колокольцева Ирина Михайловна** — аспирант, кафедра информатики и математического моделирования, Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, п. Молодежный, Иркутский район, Российская Федерация, e-mail: 89025190281@yandex.ru.

**Иваньо Ярослав Михайлович** — доктор технических наук, профессор, проректор по цифровой трансформации, Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, п. Молодежный, Иркутский район, Российская Федерация, e-mail: iasa\_econ@rambler.ru.

### Information about the Authors

**Irina M. Kolokoltseva** — PhD Student, Department of Computer Science and Mathematical Modeling, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, Molodezhny, Irkutsk District, Russian Federation, e-mail: 89025190281@yandex.ru.

**Yaroslav M. Ivanyo** — Doctor of Technical Sciences, Vice-Rector for Digital Transformation, Professor, Department of Computer Science and Mathematical Modeling, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, Molodezhny, Irkutsk District, Russian Federation, e-mail: iasa\_econ@rambler.ru.

### Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Contribution of the Authors

The authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

### Для цитирования

Колокольцева О.В. Модели изменчивости численности саранчовых вредителей / И.М. Колокольцева, Я.М. Иваньо. — DOI 10.17150/2713-1734.2024.6(4).465-477. — EDN DZKBYX // *System Analysis & Mathematical Modeling*. — 2024. — Т. 6, № 4. — С. 465–477.

### For Citation

Kolokoltseva I.M., Ivanyo Ya.M. Models of Variability of Locust Pest Number. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2024, vol. 6, no. 4, pp. 465–477. (In Russian). EDN: DZKBYX. DOI: 10.17150/2713-1734.2024.6(4).465-477.