

Научная статья

УДК 633.34:632.9:004.9

EDN KRZGQN

<https://doi.org/10.22450/1999-6837-2026-20-2-33-46>**Совместное применение данных наземных и дистанционных наблюдений для оценки эффективности систем защиты посевов сои****Алексей Сергеевич Степанов¹, Анна Геннадьевна Тишкова²,
Артем Сергеевич Бордаков³**^{1,2} Дальневосточный научно-исследовательский институт сельского хозяйства
Хабаровский край, Хабаровск, Россия³ Вычислительный центр Дальневосточного отделения Российской академии наук
Хабаровский край, Хабаровск, Россия¹ stepanfx@mail.ru, ² Betula2717@mail.ru, ³ 979artem979@gmail.com

Аннотация. Представлен опыт оценки эффективности систем защиты растений в посевах сои сорта Хабаровский юбиляр на опытном поле Дальневосточного научно-исследовательского института сельского хозяйства с использованием данных наземных и дистанционных наблюдений. В 2024 г. изучались четыре системы на экспериментальных участках общей площадью более 2 га. На контрольном и экспериментальных участках проводился трехкратный учет численности сорняков, определялась степень развития заболеваний всходов и корневых гнилей, оценивались структурные показатели продуктивности. По результатам ежемесячной аэрофотосъемки опытного поля посредством квадрокоптера DJI Mavic 3M были построены средние аппроксимированные ряды сезонного хода NDVI и рассчитаны значения ширины максимума NDVI на половине высоты для каждого участка ($d_{1/2}$). Достоверно установлено, что применение всех четырех вариантов привело к снижению засоренности посевов сои на вторую и третью учетные даты (в 5–9 раз по сравнению с контролем), уменьшению развития болезней всходов и корневых гнилей. Структурные показатели продуктивности сои в вариантах с защитой превышали контрольные уровни в 1,4–2,0 раза. Корреляционный анализ выявил сильную положительную связь показателя $d_{1/2}$ с засоренностью на вторую и третью учетные даты (коэффициент корреляции равен 0,97 при $p < 0,05$), а также обратную корреляцию засоренности с количеством продуктивных узлов (коэффициент корреляции от минус 0,88 до минус 0,9) и урожайностью (коэффициент корреляции равен минус 0,75). Таким образом, параметр $d_{1/2}$, рассчитанный по аппроксимированным временным рядам NDVI, может служить интегральным дистанционным индикатором засоренности и эффективности систем защиты посевов сои. Использование этого показателя дает возможность выявить участки постоянного развития сорняков в посевах сои по результатам нескольких лет наблюдений и разработать стратегию применения систем защиты растений для подобных участков.

Ключевые слова: фитосанитарный мониторинг, засоренность, соя, Дальний Восток, беспилотные летательные аппараты, системы защиты растений

Для цитирования: Степанов А. С., Тишкова А. Г., Бордаков А. С. Совместное применение данных наземных и дистанционных наблюдений для оценки эффективности систем защиты посевов сои // Дальневосточный аграрный вестник. 2026. Том 20. № 2. С. 33–46. <https://doi.org/10.22450/1999-6837-2026-20-2-33-46>.

Original article

Combined use of ground-based and remote sensing data to assess the effectiveness of soybean protection systems**Alexey S. Stepanov¹, Anna G. Tishkova², Artyom S. Bordakov³**^{1,2} Far Eastern Agricultural Research Institute, Khabarovsk krai, Khabarovsk, Russian Federation

³ Computing Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
Khabarovsk krai, Khabarovsk, Russian Federation

¹ stepanfx@mail.ru, ² Betula2717@mail.ru, ³ 979artem979@gmail.com

Abstract. The article describes the experience of evaluating the effectiveness of plant protection systems in soybean crops in the experimental field of the Far Eastern Agricultural Research Institute using ground-based and remote observations. In 2024, three-fold accounting of the number of weeds was carried out at the control and experimental sites, the degree of development of diseases of seedlings and root rot was determined, and structural productivity indicators were evaluated. Based on the results of the monthly aerial survey of the experimental field by a quadcopter, the average approximate series of the seasonal NDVI course were constructed and the width values of the NDVI maximum at half the height for each section ($d_{1/2}$) were calculated. It has been reliably established that the use of all four options led to a decrease in the contamination of soybean crops on the second and third accounting dates (by 5–9 times compared with the control), a decrease in the development of diseases of seedlings and root rot. The structural indicators of soybean productivity in the protected variants exceeded the control levels by 1.4–2.0 times. Correlation analysis revealed a strong positive relationship between the $d_{1/2}$ indicator and field contamination on the second and third accounting dates (correlation coefficient is 0.97 at $p < 0.05$) and an inverse correlation of contamination with the number of productive nodes (correlation coefficient from minus 0.88 to minus 0.9) and yield (correlation coefficient is minus 0.75). Thus, the proposed parameter can serve as an integral remote indicator of contamination and effectiveness of soybean crop protection systems. Its use makes it possible to identify areas of permanent weed development in soybean crops based on the results of several years of observations and develop a strategy for the use of plant protection systems.

Keywords: phytosanitary monitoring, contamination, soybeans, Far East, unmanned aerial vehicles, plant protection systems

For citation: Stepanov A. S., Tishkova A. G., Bordakov A. S. Combined use of ground-based and remote sensing data to assess the effectiveness of soybean protection systems. *Dal'nevostochnyi agrarnyi vestnik*. 2026;20;2:33–46. (in Russ.). <https://doi.org/10.22450/1999-6837-2026-20-2-33-46>.

Введение. Соя является одной из наиболее ценных культур в мировом и российском растениеводстве, занимающей значительные площади, особенно в регионах с муссонным климатом, таких как Дальний Восток России. Однако особенности муссонного климата не позволяют в полной степени реализовать генетический потенциал сортов сои, как по урожайности, так и по качественным характеристикам. В условиях высокой влажности в начале вегетации и частых температурных стрессов фитосанитарная обстановка на полях сои может резко ухудшаться, что приводит к существенным потерям урожая [1, 2]. В целом, засоренность посевов и инфекционные заболевания (корневые гнили, листовые инфекции) являются проблемой в мировом производстве сои и зачастую связываются с влажностными характеристиками [3, 4].

Исследования засоренности и заболеваемости культурных растений чаще

всего базируются на наземных фитосанитарных обследованиях, учетах численности сорняков и визуальной оценке показателей, характеризующих развитие и распространение болезней. Несмотря на широкое использование, такие методы трудозатратны, субъективны и не всегда позволяют оперативно оценить состояние посевов, в том числе учесть вариативность состояния на поле [5].

В последние десятилетия активно развиваются методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), позволяющие получать пространственно-распределенную информацию о состоянии посевов без трудозатратных выездов на поля, в том числе и для фитосанитарного мониторинга [6, 7]. Чаще всего для оценки неоднородности посевов используют результаты съемки беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), применяемые как для оперативного мониторинга, так и для выявления зон постоянной засоренности [7, 8]. При

этом в основе могут лежать как методы глубокого машинного обучения с непосредственной детекцией сорняков, так и вегетационные индексы, прежде всего нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI). Многочисленными исследованиями показана возможность использования NDVI для оценки биомассы, фотосинтетической активности и стрессового состояния культур [9].

Однако прямое применение NDVI для оценки засоренности посевов после смыкания растений затруднено из-за отсутствия спектральных различий между культурой и сорняками [10].

В этой связи актуальным направлением является поиск новых дистанционных предикторов, которые позволят оценить изменения растительного покрова, обусловленные сорной растительностью и воздействием патогенов. Одним из таких подходов является анализ формы кривой сезонного хода NDVI. В частности, было предложено оценивать ширину максимума NDVI в качестве характеристики засоренности посевов. Было установлено, что ширина пика на половине и трех четвертях высоты коррелирует с количеством сорняков (шт./м²) в конце периода «всходы – цветение» и начале периода «цветение – плодоношение» [11].

Эффективность систем защиты растений зависит не только от набора действующих веществ, но и от сроков, кратности обработок и своевременности принятия решений. Комплексные системы, включающие протравливание семян, довсходовую и послевсходовую химическую прополку, а также биологические и питательные компоненты, требуют интегральной оценки, в том числе по результатам наземных и дистанционных исследований [12]. Исследователями показано, что использование современных средств защиты в Дальневосточном регионе позволяет существенно снизить потери урожая от сорной растительности и болезней при производстве сои [13, 14]. Совместный анализ наземных фитосанитарных показателей (численность сорняков, развитие болезней), структурных показателей продуктивности и характеристик, получаемых с БПЛА, может стать основой для объективной оценки эффективности различных технологий защиты.

Цель исследований – изучить возможность совместного применения данных дистанционного зондирования Земли и наземных наблюдений для оценки эффективности различных систем защиты посевов. Для реализации цели были поставлены следующие задачи:

1. Провести фитосанитарный мониторинг посевов сои, оценить структурные характеристики продуктивности сорта на контрольном и экспериментальных участках.

2. В течение вегетационного периода провести регулярную периодическую аэрофотосъемку посевов сои, построить кривые сезонного хода NDVI, рассчитать характеристики кривых сезонного хода NDVI (ширину пика).

3. Выявить достоверные взаимосвязи между результатами наземных наблюдений и дистанционного зондирования.

Полученные результаты позволяют обосновать возможность использования данных ДЗЗ для интегральной оценки фитосанитарного состояния посевов сои при различных технологиях защиты.

Материалы и методы исследований. В качестве объектов исследований выступали сорт сои Хабаровский юбилей, а также различные пестициды и их баковые смеси. Схема опыта показана в таблице 1.

Исследования проводились на контрольном (без обработок) участке площадью 0,18 га и экспериментальных участках (четыре варианта) площадью 0,76; 0,36; 0,36 и 0,90 га.

Протравливание семян баковыми смесями препаратов проводилось за сутки до посева (18.05.2024). Норма высева составила 70 кг/га (350 тыс. шт./га). В качестве удобрений использована нитроаммофоска в дозе 250 кг/га в физическом весе ($N_{16}P_{16}K_{16}$) (одновременно с посевом).

25 мая проведена обработка почвенными гербицидами; 27 июня – обработка послевсходовыми гербицидами и фунгицидами в фазу 1–2 тройчатых листьев и внесение комплексного водорастворимого удобрения; 5 июля – обработка послевсходовыми гербицидами в фазу 3–4 листьев; 14 июля – обработка фунгицидами и инсектицидами в фазу бутонизации.

Для выявления гербицидной активности изучаемых препаратов проводили

Таблица 1 – Схема опыта и технологических приемов

Table 1 – Experimental design and technological practices

Вариант	Препарат/ баковая смесь	Норма расхода, л/га; кг/га	Сроки и способы обработки
Контроль	без обработок		
1	Стандак Топ, КС Хайкоут Супер Соя Хайкоут Турбо Соя Хайкоут супер Экстендер	1,5 1,42 1,42 1,1	обработка семян перед посевом
	Фронтьер Оптима, КЭ	1,2	опрыскивание почвы после посева до всходов культуры
	Корум, ВРК Цериакс плюс, КЭ ДАШ (ПАВ)	2,0 0,5 1,0	опрыскивание посевов в фазе 1–2 тройчатых листа
	Хилер, КЭ	1,5	опрыскивание посевов в фазе 3–4 тройчатых листьев
	Пиктор Актив, КС	0,6	опрыскивание посевов в фазе бутонизации
2	Тирада, СК	1,5	обработка семян перед посевом
	Трейсер, КЭ Лазурит Ультра, СК	0,6 0,5	опрыскивание почвы после посева до всходов культуры
	Когорта, ВГР Алсион, ВДГ Квикстеп, КМЭ Аллюр	1,8 0,006 0,8 0,2	опрыскивание посевов в фазе 1–2 тройчатых листа
	Спирит, СК Борей Нео, СК Аллюр	0,3 0,2 0,2	опрыскивание посевов в фазе начала бобообразования
3	Импульс, КС Бэкграунд (ПАВ)	0,12 0,12	опрыскивание почвы после посева до всходов культуры
	Глобал, ВР Фомесофт, ВР Корнет (ПАВ)	0,8 1,2 0,2	опрыскивание посевов в фазе 1–2 тройчатых листа
	Макси Злак, КЭ	1,2	опрыскивание посевов в фазе 3–4 тройчатых листьев
	Оскар, КЭ Альтер, КЭ	0,8 0,1	опрыскивание посевов в фазе бутонизации
4	Тристар, КС	3,0	опрыскивание почвы после посева до всходов культуры
	Гарнизон, ВР Лемур, КЭ Алсион, ВДГ	2,0 1,5 0,006	опрыскивание посевов в фазе 1–2 тройчатых листа
	комплексное водорастворимое удобрение	–	опрыскивание посевов в фазе 2–3 тройчатых листа

три обследования посевов и определяли количество сорняков (шт./м²):

первое – через 30 дней после внесения почвенных гербицидов (13 июня), X_1 ; второе – через 30 дней после опры-

скивания послевсходовыми гербицидами (25 июля), X_2 ; третье – в период созревания (17 сентября), X_3 .

Численно-видовой учет осуществлялся на закрепленных площадках по

каждому варианту в четырехкратной повторности на площади 0,25 м² [15].

Фитопатологические наблюдения в посевах сои проводили с фазы всходов до окончания фазы налива зерна. Через каждые 10–15 дней определяли интенсивность развития и распространения основных заболеваний сои путем отбора (или осмотра) растений через равное расстояние (не менее 10 растений в 5 местах). Степень развития устанавливали по шкалам в баллах, отдельно по каждой болезни, используя методику [16].

Распространение болезни вычисляли по формуле (1) [17]:

$$P = \frac{n}{N} \cdot 100 \quad (1)$$

где P – распространение болезни, %;

n – количество больных растений, шт.;

N – общее количество осматриваемых растений, шт.

Средний процент развития заболевания рассчитывали по формуле (2) [17]:

$$R = \frac{\sum(a \cdot b)}{N \cdot k} \cdot 100 \quad (2)$$

где R – развитие болезни, %;

$\sum(a \cdot b)$ – сумма произведений числа больных растений (a) на соответствующий им балл поражения (b);

N – общее количество осматриваемых растений, шт.;

k – высший балл шкалы учета.

Учет урожая проводили весовым методом путем ручной уборки учетной делянки с каждого варианта с последующей обработкой растений в лаборатории. Оценка продуктивности сорта выполнялась путем измерения следующих структурных параметров: высота растений; количество продуктивных узлов; количество бобов на растении; количество семян на растении; вес семян на растении; масса 1 000 семян; также была рассчитана биологическая урожайность [18].

Гидротермические условия, сложившиеся в начале вегетационного периода 2024 г., не способствовали развитию заболеваний сои. Среднесуточные температу-

ры в июне опускались на 2,1–4,6 °C ниже среднесуточных показателей. В целом, июнь был холоднее обычного на 2,5 °C, а количество осадков превысило норму на 76 %. Среднесуточные температуры воздуха в июле находились в пределах нормы, в отдельные периоды температуры поднимались выше 30 °C. Количество выпавших осадков оказалось практически в 2 раза ниже многолетних показателей. Такие условия внешней среды не способствовали массовому развитию фитопатогенов.

Август и сентябрь характеризовались термическими показателями, превышающими средние многолетние значения на 0,6–0,7 °C, и количеством осадков в пределах 80 % от нормы.

Аэрофотосъемка опытного поля проводилась посредством квадрокоптера DJI Mavic 3M на высоте 300 м в следующие даты: 30.04; 02.06; 01.07; 01.08; 01.09; 30.09; 28.10. С использованием программного обеспечения DJI Terra осуществляли геопривязку, геокодирование, калибровку снимков и строили ортофотоплан на каждый день съемки.

Таким образом были получены значения каналов RED (красная область спектра) и NIR (ближняя инфракрасная область спектра) для всех пикселей опытного поля. Предобработанные значения каналов использованы для расчета значений $NDVI$ с пространственным разрешением 1 м по следующей формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (3)$$

Далее формировались сезонные аппроксимированные временные ряды значений $NDVI$ с использованием разработанного в Хабаровском федеральном информационном центре ДВО РАН программного обеспечения.

Для аппроксимированных рядов $NDVI$ по каждому пикселю контрольного и экспериментального участков рассчитывалось значение $d_{1/2}$ (ширина максимума $NDVI$ на половине высоты) в качестве дистанционной характеристики засоренности посевов [11].

Значимость различий засоренности для контрольного и экспериментальных

участков оценивали методами однофакторного дисперсионного анализа; апостериорное попарное сравнение проводили с использованием критерия Тьюки.

Для оценки взаимосвязей между результатами наземных и дистанционных наблюдений рассчитывали коэффициенты корреляции Пирсона.

Результаты исследований. В таблице 2 представлены результаты оценки засоренности посевов сои в контроле и на экспериментальных участках. Как видно, 13 июня количество сорняков, произрастающих на контрольном участке, составляло 130 шт./м², а на экспериментальных участках – в среднем 91 шт./м². При этом верхняя граница доверительного интервала была существенно выше (239 шт./м²). Таким образом, достоверных различий для этой даты выявлено не было.

Однако использование химических приемов контроля численности сорняков в посевах сои в фазу 2–3 тройчатых листьев культуры через 30 дней после внесения снижало общее количество сорных растений с 360 шт./м² до 39 экземпляров в среднем по вариантам и с 213 до 21 шт./м² в период спелости.

При появлении массовых всходов растений сои на семядольных листьях отмечены пятна различной формы и окраски, которые обусловлены наличием семенной и почвенной инфекций. В контрольном варианте признаки заболевания отмечены на 27,3 % растений со степенью пора-

жения 6,8 %. Пониженные температуры воздуха, большое количество осадков и наличие внешней патогенной микрофлоры на молодых растениях способствовали массовому развитию корневых гнилей на начальных этапах онтогенеза сои, поэтому степень развития корневых гнилей в этот период уже достигала 25,9 %. Массовое цветение растений сои проходило при недостатке осадков, что сдерживало развитие заболевания и к фазе цветения пораженность растений увеличилась всего на 5,4 %, но признаки заболевания отмечались на всех растениях (табл. 3).

Фунгистатические свойства препаратов, используемых для предпосевного протравливания семян сои, достоверно снижали интенсивность развития и распространение болезней всходов почти в 3,6 раза, а корневых гнилей – в полтора раза (табл. 3).

В таблице 4 приведены структурные элементы продуктивности сои сорта Хабаровский юбилей в контроле и с применением систем защиты. Установлены достоверные отличия средних характеристик урожайности сорта на экспериментальных участках от контроля по следующим показателям:

- 1) количество продуктивных узлов – 13,9 шт. против 10,1 шт.;
- 2) количество бобов на одном растении – 491 шт. против 274 шт.;
- 3) количество семян на одном растении – 1 169 шт. против 557 шт.;

Таблица 2 – Засоренность посевов сои сорта Хабаровский юбилей на контрольном и экспериментальных участках

Table 2 – Weed infestation of soybean crops of the variety Khabarovsky yubilyar on the control and experimental plots

В шт./м² (in plants/m²)

Варианты	Первый учет (13.06.2024)	Второй учет (25.07.2024)	Третий учет (17.09.2024)
Контроль	130	360	213
Первый	109	61	21
Второй	22	12	15
Третий	104	28	12
Четвертый	127	54	35
Среднее по 1–4 вариантам	91	39	21
Среднеквадратичное отклонение	46,7	22,8	10,2
Верхняя граница доверительного интервала	239	111	37

Таблица 3 – Уровень развития и распространения болезней всходов и корневых гнилей в посевах сои сорта Хабаровский юбилей на контрольном и экспериментальных участках

Table 3 – Level of development and incidence of seedling diseases and root rots in soybean crops of the variety Khabarovsky yubilyar on the control and experimental plots

В процентах (in percent)

Варианты	Болезни всходов		Корневые гнили	
	R_1 , %	P_1 , %	R_2 , %	P_2 , %
Контроль	6,8	27,3	31,3	100,0
Первый	2,2	8,9	19,4	77,7
Второй	1,7	6,8	17,5	70,0
Третий	2,8	11,1	15,0	60,0
Четвертый	1,0	4,1	30,0	100,0
Среднее по 1–4 вариантам	1,9	7,7	20,5	76,9
Среднеквадратичное отклонение	0,8	3,0	6,6	17,0
Верхняя граница доверительного интервала	4,4	17,2	41,5	100,0

Таблица 4 – Структурные показатели продуктивности сои сорта Хабаровский юбилей на контрольном и экспериментальных участках

Table 4 – Structural productivity indicators of soybean of the variety Khabarovsky yubilyar on the control and experimental plots

Варианты	Показатели						
	h , см	K_y , шт.	K_6 , шт.	K_c , шт.	P_c , г	m_c , г	y , т/га
Контроль	85,7	10,1	274,0	557,0	97,6	178,3	1,4
Первый	83,0	13,8	456,6	1 084,3	186,5	171,2	2,6
Второй	83,5	14,4	498,0	1 176,0	202,8	172,5	2,8
Третий	89,5	12,7	436,0	980,0	163,1	166,4	2,3
Четвертый	95,4	14,6	575,0	1 436,0	256,8	178,9	3,6
Среднее по 1–4 вариантам	87,9	13,9	491,4	1 169,1	202,3	172,3	2,8
Среднеквадратичное отклонение	5,8	0,9	61,4	195,1	37,8	5,2	0,6
Верхняя граница доверительного интервала	106,4	16,6	686,8	1 790,1	309,0	188,6	4,4
Нижняя граница доверительного интервала	69,3	11,2	296,0	598,1	105,6	155,9	1,5
Примечания: h – высота растений; K_y – количество продуктивных узлов; K_6 – количество бобов на растении; K_c – количество семян на растении; P_c – вес семян на растении; m_c – масса 1 000 семян; y – биологическая урожайность.							

4) вес семян на одном растении – 202,3 г против 97,6 г;

5) биологическая урожайность сои – 2,8 т/га против 1,4 т/га.

На рисунке 1 представлено пространственное распределение $NDVI$ в контрольном и экспериментальных вариантах. Как видно, оценка засоренности после смыка-

ния посевов сои с использованием спутниковых данных практически невозможна. Значения $NDVI$, рассчитанные по результатам съемки на 1 августа и 1 сентября, не имели высокой пространственной вариативности в границах участков. Однако по состоянию на 1 июля визуально заметны неоднородности, связанные с зарастанием

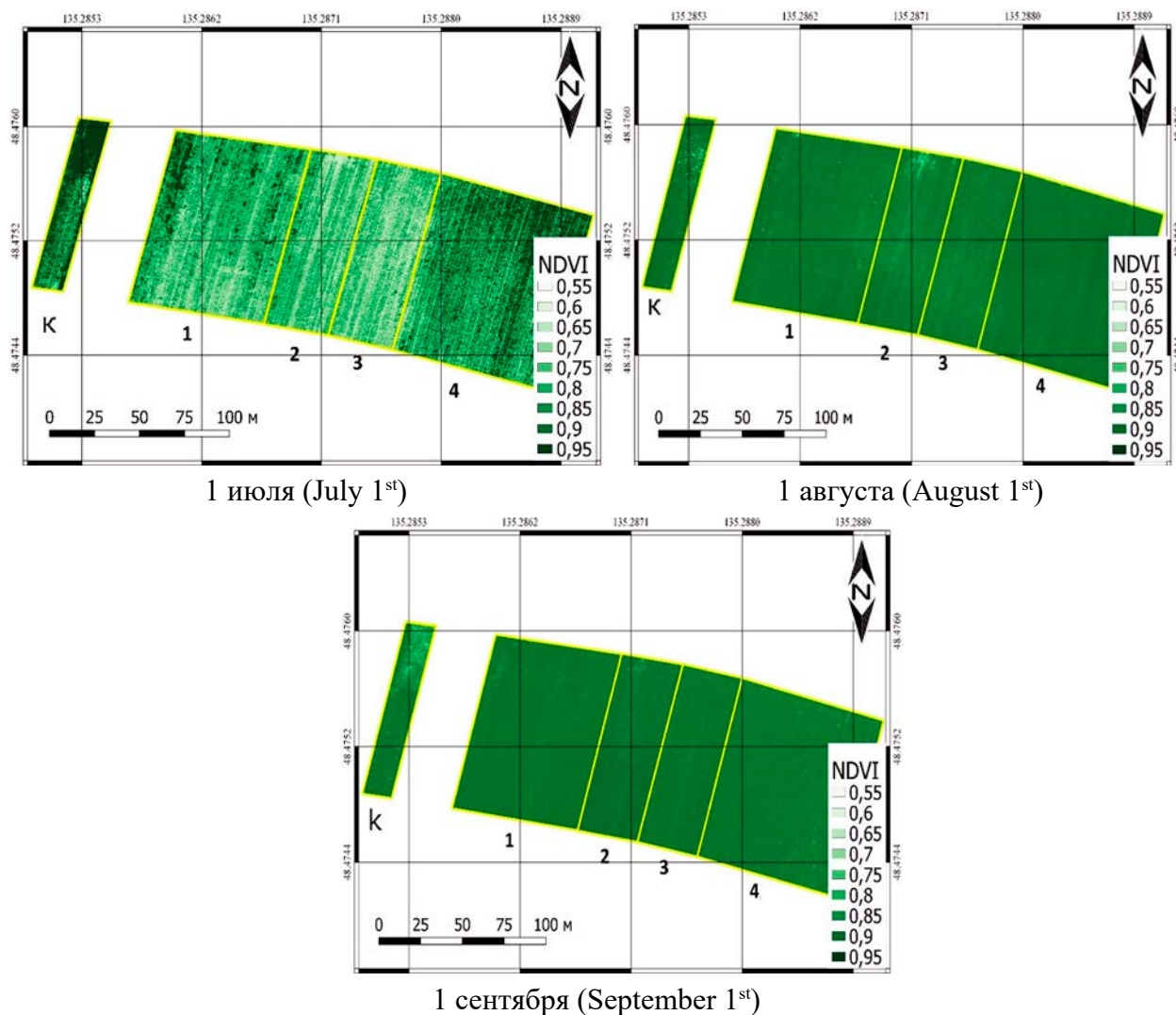


Рисунок 1 – Пространственное распределение значений $NDVI$ на контрольном и экспериментальных участках

Figure 1 – Spatial distribution of $NDVI$ values on the control and experimental plots

северной части контрольного участка осотом, а также различия при использовании разных систем защиты растений.

Как следует из таблицы 5, коэффициенты вариации значений $NDVI$ для разных участков сои находились в диапазоне 9,8–16,0 % для съемки 1 июля и в интервалах 0,5–2,4 % и 0,8–3,5 % по результатам съемок 1 августа и 1 сентября соответственно. При этом численные значения показателя соответствовали 0,87–0,89 для 1 августа и 0,86–0,88 для 1 сентября. Разброс средних значений $NDVI$ для 1 июля в вариантах с использованием систем защиты составил от 0,40 до 0,52, а соответствующий показатель контрольного участка был равен 0,58.

В таблице 6 представлены рассчитанные средние значения $d_{1/2}$ аппроксимированной кривой сезонного хода $NDVI$ для контрольного и экспериментальных участков. Как видно, среднее значение показателя в контроле оказалось равным 104,0 дня, а в экспериментах с разными системами защиты достоверно ниже и составило от 85,9 до 91,8 дня.

При этом вариативность средней величины $d_{1/2}$ была выше в контроле, что видно из таблицы 6 и рисунка 2. Коэффициент вариации для контрольного участка был равен 9,6 %, а для экспериментальных он соответствовал 2,8–6,5 %.

Как видно из диаграммы размаха, частичная засоренность также присут-

Таблица 5 – Значения максимума $NDVI$ посевов сои сорта Хабаровский юбилей на контрольном и экспериментальных участкахTable 5 – Maximum $NDVI$ values of soybean crops of the variety Khabarovsky yubilyar on the control and experimental plots

Даты	Характеристика	Варианты				
		контроль	1	2	3	4
01.07	Среднее значение со стандартным отклонением	0,58±0,01	0,48±0,01	0,40±0,01	0,40±0,01	0,52±0,01
	Коэффициент вариации, %	16,0	20,1	9,8	10,7	11,1
01.08	Среднее значение со стандартным отклонением	0,88±0,01	0,87±0,01	0,87±0,01	0,87±0,01	0,89±0,01
	Коэффициент вариации, %	1,4	1,1	2,4	1,4	0,5
01.09	Среднее значение со стандартным отклонением	0,86±0,01	0,88±0,01	0,88±0,01	0,88±0,01	0,88±0,01
	Коэффициент вариации, %	3,5	1,1	1,0	0,8	0,8

Таблица 6 – Характеристики ширины максимума средней $d_{1/2}$ аппроксимированной кривой сезонного хода $NDVI$ посевов сои сорта Хабаровский юбилей на контрольном и экспериментальных участкахTable 6 – Characteristics of the maximum width average $d_{1/2}$ of the approximated seasonal $NDVI$ curve for soybean crops of the variety Khabarovsky yubilyar on the control and experimental plots

Показатели	Варианты				
	контроль	1	2	3	4
Среднее со стандартным отклонением, дни	104,0±0,7	89,3±0,4	85,9±0,1	86,2±0,2	91,8±0,2
Коэффициент вариации, %	9,6	6,5	3,0	2,8	2,9
p_{anova}	<0,05				
p (контроль – варианты)	-	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05

ствовала на экспериментальных участках 1 и 4, что также было вызвано зарастанием северных частей участков осотом.

Проведенный корреляционный анализ позволил выявить взаимосвязи между результатами наземных и дистанционных наблюдений. Как видно из таблицы 7, показатель $d_{1/2}$ имел достоверную положительную корреляцию с засоренностью посевов при втором и третьем учетах (коэффициент корреляции в обоих случаях был равен 0,97).

При этом показатели засоренности посевов на 25 июля и 17 сентября положительно коррелировали со степенью разви-

тия и распространения листостебельных инфекций (коэффициенты корреляции составили 0,94 и 0,93 соответственно). Вместе с тем они обратно коррелировали с показателями количества продуктивных узлов, количества бобов и семян на растении, массы 1 000 семян, биологической урожайности (табл. 8). Значимая корреляция отмечалась между количеством продуктивных узлов и засоренностью посевов по второму и третьему учету (коэффициенты корреляции равны минус 0,90 и минус 0,88 соответственно).

Закключение. Было достоверно установлено, что применение систем защиты

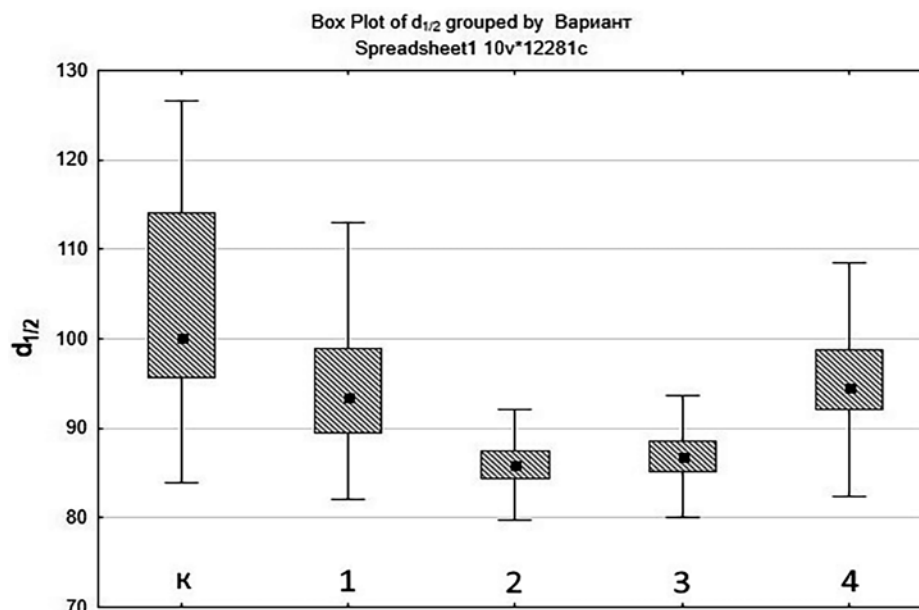


Рисунок 2 – Диаграмма размаха ширины максимума среднего $d_{1/2}$ на аппроксимированных кривых сезонного хода среднего $NDVI$ для контрольного и экспериментальных участков

Figure 2 – Box plot of the maximum width average $d_{1/2}$ on the approximated seasonal average $NDVI$ curves for the control and experimental plots

Таблица 7 – Коэффициенты корреляции Пирсона показателей засоренности и ширины максимума кривой сезонного хода $NDVI$ посевов сои

Table 7 – Pearson correlation coefficients between weed infestation indicators and the maximum width of the seasonal $NDVI$ curve for soybean crops

Показатели	Среднее $d_{1/2}$	X_1 , шт./м ²	X_2 , шт./м ²	X_3 , шт./м ²
Среднее $d_{1/2}$	–	0,58 ($p = 0,30$)	0,97 ($p = 0,01$)	0,97 ($p = 0,01$)
X_1 , шт./м ²	0,58 ($p = 0,30$)	–	0,50 ($p = 0,39$)	0,44 ($p = 0,45$)
X_2 , шт./м ²	0,97 ($p = 0,01$)	0,50 ($p = 0,39$)	–	0,99 ($p = 0,01$)
X_3 , шт./м ²	0,97 ($p = 0,01$)	0,44 ($p = 0,45$)	0,99 ($p = 0,01$)	–

Таблица 8 – Коэффициенты корреляции Пирсона показателей засоренности, степени развития болезней и структурных характеристик посевов сои

Table 8 – Pearson correlation coefficients between weed infestation indicators, disease development incidence, and structural characteristics of soybean crops

Показатели	X_2 , шт./м ²	X_3 , шт./м ²	K_y , шт.	K_6 , шт.	K_e , шт.	m_e , г	y , т/га	R_1 , %	P_1 , %
X_2 , шт./м ²	–	0,99 (0,01)	–0,90 (0,04)	–0,85 (0,07)	–0,82 (0,09)	–0,77 (0,13)	–0,76 (0,13)	0,94 (0,02)	0,94 (0,01)
X_3 , шт./м ²	0,99 (0,01)	–	–0,88 (0,04)	–0,83 (0,08)	–0,80 (0,10)	–0,75 (0,15)	–0,74 (0,16)	0,93 (0,02)	0,93 (0,02)
K_y , шт.	–0,90 (0,04)	–0,88 (0,04)	–	0,96 (0,01)	0,96 (0,01)	0,94 (0,02)	0,94 (0,02)	–0,99 (0,01)	–0,98 (0,01)
K_6 , шт.	–0,85 (0,07)	–0,83 (0,08)	0,96 (0,01)	–	0,99 (0,01)	0,99 (0,01)	0,99 (0,01)	–0,98 (0,01)	–0,97 (0,01)

Продолжение таблицы 8

Показатели	X_2 , шт./м ²	X_3 , шт./м ²	K_y , шт.	K_6 , шт.	K_c , шт.	m_c , г	y , т/га	R_1 , %	P_1 , %
K_c , шт.	-0,82 (0,09)	-0,80 (0,10)	0,96 (0,01)	0,99 (0,01)	—	0,99 (0,01)	0,99 (0,01)	-0,96 (0,01)	-0,96 (0,01)
m_c , г	-0,77 (0,13)	-0,75 (0,15)	0,94 (0,02)	0,99 (0,01)	0,99 (0,01)	—	0,99 (0,01)	-0,94 (0,01)	-0,94 (0,01)
y , т/га	-0,76 (0,13)	-0,74 (0,16)	0,94 (0,02)	0,99 (0,01)	0,99 (0,01)	0,99 (0,01)	—	-0,93 (0,01)	-0,93 (0,01)
R_1 , %	0,94 (0,02)	0,93 (0,02)	-0,99 (0,01)	-0,98 (0,01)	-0,96 (0,01)	-0,94 (0,01)	-0,93 (0,01)	—	0,99 (0,01)
P_1 , %	0,94 (0,01)	0,93 (0,02)	-0,98 (0,01)	-0,97 (0,01)	-0,96 (0,01)	-0,94 (0,01)	-0,93 (0,01)	0,99 (0,01)	—

Примечание: в скобках указана величина статистической значимости p .

растений (варианты 1–4) по сравнению с контролем способствовало снижению засоренности посевов сои (в 5–9 раз), уменьшению интенсивности развития болезней всходов и корневых гнилей (в 3,5 и 1,5 раза соответственно). Структурные показатели продуктивности (количество продуктивных узлов, бобов, семян на растении, вес семян, урожайность) в вариантах с использованием систем защиты растений превышали контрольные значения в 1,4–2,0 раза.

В результате проведенного полевого эксперимента с использованием совместного анализа наземных наблюдений и данных дистанционного зондирования установлено, что использование абсолютных значений $NDVI$ в период полного смыкания посевов сои (август – сентябрь) не позволяет выявить значимые различия в состоянии посевов контрольного и экспериментальных участков. Для всех участков в этот период была характерна низкая пространственная вариативность $NDVI$ (коэффициенты вариации 0,5–3,5 %). Вместе с тем, показатель ширины максимума $NDVI$ на половине высоты $d_{1/2}$, соответ-

ствующий продолжительности периода активной вегетации, продемонстрировал возможности для оценки засоренности и эффективности систем защиты растений.

Была выявлена достоверная положительная связь показателя $d_{1/2}$ с засоренностью на вторую и третью учетные даты (коэффициент корреляции соответствовал 0,97, $p < 0,05$), а также обратная корреляция засоренности с количеством продуктивных узлов (с коэффициентом в диапазоне от минус 0,88 до минус 0,90) и урожайностью (минус 0,75).

В целом, параметр $d_{1/2}$, рассчитанный для аппроксимированных временных рядов $NDVI$, в качестве дистанционного индикатора засоренности может использоваться для оценки эффективности систем защиты растений. Полученные результаты обосновывают целесообразность расчета этого показателя при проведении фитосанитарного мониторинга с использованием беспилотных летательных аппаратов, что позволяет повысить объективность оценки различных защитных мероприятий и оптимизировать принятие решений в точном земледелии.

Список источников

1. Саенко Г. М. Фитосанитарный мониторинг сои на Дальнем Востоке // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. 2022. № 4 (68). С. 120–133. doi: 10.32786/2071-9485-2022-04-15. EDN RCRIYU.
2. Выборова Т. А., Безмутко С. В. Анализ фитосанитарного состояния соевых посевов в условиях Приморского края // Дальневосточный аграрный вестник. 2022. Т. 16. № 4. С. 19–26. doi: 10.22450/199996837_2022_4_19. EDN RXNOGO.
3. Gawęda D., Haliniarz M., Bronowicka-Mielniczuk U., Łukasz J. Weed infestation and health of the soybean crop depending on cropping system and tillage system // Agriculture. 2020. Vol. 10. No. 6. Art. 208. doi: 10.3390/agriculture10060208.

4. Khaffagy A. E., Mazrou Y. S. A., Morsy A. R., El-Mansoury M. A. M., El-Tokhy A. I., Hafez Y. Impact of irrigation levels and weed control treatments on annual weeds, physiological traits and productivity of soybean under clay soil conditions // *Agronomy*. 2022. Vol. 12. No. 5. Art. 1037. doi: 10.3390/agronomy12051037.

5. Лысов А. К., Корнилов Т. В. Цифровые технологии дистанционного мониторинга для дискретного внесения средств защиты растений // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2019. № 1 (98). С. 17–26. doi: 10.24411/0131-5226-2019-10118. EDN DRKGPC.

6. Павлюшин В. А., Лысов А. К. Фитосанитарная безопасность агроэкосистем и дистанционный фитосанитарный мониторинг в защите растений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 3. С. 69–78. doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-69-78. EDN TLBKYY.

7. Шпанев А. М., Петрушин А. Ф. Применение гиперспектральной съемки с беспилотного летательного аппарата для оценки засоренности посевов зерновых культур // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2025. Т. 22. № 3. С. 136–148. doi: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-136-148. EDN SDSYLM.

8. Tetila E. K., Moro B. L., Astolfi G. Real-time detection of weeds by species in soybean using UAV images // *Crop Protection*. 2024. Vol. 184. Art. 106846. doi:10.1016/j.cropro.2024.106846.

9. Sharma V., Honkavaara E., Hayden M., Kant S. UAV remote sensing phenotyping of wheat collection for response to water stress and yield prediction using machine learning // *Plant Stress*. 2024. Vol. 12. Art. 100464. doi: 10.1016/j.stress.2024.100464.

10. Якушев В. П., Блохин Ю. И., Блохина С. Ю. Теоретические основы дистанционной и наземной количественной оценки внутриполевой изменчивости для точного земледелия. СПб. : Агрофизический научно-исследовательский институт, 2023. 75 с.

11. Степанов А. С., Мороховец Т. В., Фомина Е. А. Оценка засоренности посевов сои на юге Дальнего Востока по данным спутника Sentinel-2 // *Достижения науки и техники АПК*. 2025. Т. 39. № 3. С. 16–21. doi: 10.53859/02352451_2025_39_3_16. EDN ХНКABG.

12. Родимцев С. А., Павловская Н. Е. Сравнительная оценка новых систем защиты и прогнозирования урожайности зерновых культур на основе данных NDVI // *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*. 2023. № 1. С. 69–79. doi: 10.36718/1819-4036-2023-1-69-79. EDN JZZITL.

13. Тишкова А. Г., Асеева Т. А. Влияние различных систем защиты на уровень развития основных фитопатогенов сои в Хабаровском крае // *Вестник университета биотехнологий*. 2025. № 1. С. 101–111. doi: 10.31677/2072-6724-2025-74-1-101-111. EDN FZRKMN.

14. Тишкова А. Г., Юрченко Т. С., Суняйкин А. А. Биологическая эффективность гербицидных обработок посевов сои и их влияние на урожайность // *Агронаука*. 2024. Т. 2. № 2. С. 84–92. doi: 10.24412/2949-2211-2024-2-2-84-92. EDN YTIJAL.

15. Спиридонов Ю. Я., Ларина Г. Е., Шестаков В. Г. Методическое руководство по изучению гербицидов, применяемых в растениеводстве. М. : Печатный Город, 2009. 247 с.

16. Попова О. В., Салманова И. А., Рукин В. Ф. Защита сои от вредных организмов. Воронеж : Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, 2015. 60 с.

17. Гаврилов А. А., Шутко А. П., Марюхина А. Г. Фитосанитарная диагностика болезней растений. Ставрополь : Аргус, 2004. 76 с.

18. Синеговская В. Т., Наумченко Е. Т., Кобозева Т. П. Методы исследований в полевых опытах с соей. Благовещенск : Одеон, 2016. 115 с. EDN VTTCGR.

References

1. Saenko G. M. Phytosanitary monitoring of soybean in the Far East. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa*, 2022;4(68):120-133. doi: 10.32786/2071-9485-2022-04-15. EDN RCRIYU (in Russ.).

2. Vyborova T. A., Bezmutko S. V. Analysis of the phytosanitary state of soybean crops in the conditions of Primorsky krai. *Dal'nevostochnyy agrarnyy vestnik*, 2022;16;4:19–26. doi: 10.22450/199996837_2022_4_19. EDN RXNOGO (in Russ.).

3. Gawęda D., Haliniarz M., Bronowicka-Mielniczuk U., Łukasz J. Weed infestation and health of the soybean crop depending on cropping system and tillage system. *Agriculture*, 2020; 10;6:208. doi: 10.3390/agriculture10060208.

4. Khaffagy A. E., Mazrou Y. S. A., Morsy A. R., El-Mansoury M. A. M., El-Tokhy A. I., Hafez Y. Impact of irrigation levels and weed control treatments on annual weeds, physiological traits and productivity of soybean under clay soil conditions. *Agronomy*, 2022;12;5:1037. doi: 10.3390/agronomy12051037.
5. Lysov A. K., Kornilov T. V. Digital remote monitoring technology for discrete application of plant protection products. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktov rastenievodstva i zhivotnovodstva*, 2019;1(98):17–26. doi: 10.24411/0131-5226-2019-10118. EDN DRKGPC (in Russ.).
6. Pavlyushin V. A., Lysov A. K. Phytosanitary safety of agro-ecological systems and remote phytosanitary monitoring in plant protection. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019;16;3:69–78. doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-69-78. EDN TLBKYY (in Russ.).
7. Shpanev A. M., Petrushin A. F. Application of hyperspectral imaging from an unmanned aerial vehicle to assess weed infestation of grain crops. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025;22;3:136–148. doi: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-136-148. EDN SDSYLM (in Russ.).
8. Tetila E. K., Moro B. L., Astolfi G. Real-time detection of weeds by species in soybean using UAV images. *Crop Protection*, 2024;184:106846. doi:10.1016/j.cropro.2024.106846.
9. Sharma V., Honkavaara E., Hayden M., Kant S. UAV remote sensing phenotyping of wheat collection for response to water stress and yield prediction using machine learning. *Plant Stress*, 2024;12:100464. doi: 10.1016/j.stress.2024.100464.
10. Yakushev V. P., Blokhin Yu. I., Blokhina S. Yu. *Theoretical foundations of remote and ground-based quantification of in-field variability for precision farming*, Saint Petersburg, Agrofizicheskii nauchno-issledovatel'skii institut, 2023, 75 p. (in Russ.).
11. Stepanov A. S., Morokhovets T. V., Fomina E. A. Assessment of weed infestation of soybean crops in the southern Far East using Sentinel-2 satellite data. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2025;39;3:16–21. doi: 10.53859/02352451_2025_39_3_16. EDN XHKABG (in Russ.).
12. Rodimtsev S. A., Pavlovskaya N. E. Comparative evaluation of new systems to protect and forecast crop yields based on NDVI data. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2023;1:69–79. doi: 10.36718/1819-4036-2023-1-69-79. EDN JZZITL (in Russ.).
13. Tishkova A. G., Aseeva T. A. Influence of various protection systems on the level of development of the main phytopathogens of soybean in Khabarovsk krai. *Vestnik universiteta biotekhnologii*, 2025;1:101–111. doi: 10.31677/2072-6724-2025-74-1-101-111. EDN FZRKMN (in Russ.).
14. Tishkova A. G., Yurchenko T. S., Sunyaikin A. A. Biological effectiveness of herbicide treatments of soybean crops and their influence on productivity. *Agronauka*, 2024;2;2:84–92. doi: 10.24412/2949-2211-2024-2-2-84-92. EDN YTJIAL (in Russ.).
15. Spiridonov Yu. Ya., Larina G. E., Shestakov V. G. *Guidelines for studying herbicides used in crop production*, Moscow, Pechatnyi Gorod, 2009, 247 p. (in Russ.).
16. Popova O. V., Salmanova I. A., Rukin V. F. *Protection of soybeans from harmful organisms*, Voronezh, Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut zashchity rastenii, 2015, 60 p. (in Russ.).
17. Gavrilov A. A., Shutko A. P., Maryuhina A. G. *Phytosanitary diagnostics of plant diseases*, Stavropol, Argus, 2004, 76 p. (in Russ.).
18. Sinegovskaya V. T., Naumchenko E. T., Kobozeva T. P. *Research methods in field experiments with soybeans*, Blagoveshchensk, Odeon, 2016, 115 p. EDN VTTCGR (in Russ.).

© Степанов А. С., Тишкова А. Г., Бордаков А. С., 2026

Статья поступила в редакцию 16.05.2026; одобрена после рецензирования 10.06.2026; принята к публикации 11.06.2026.

The article was submitted 16.05.2026; approved after reviewing 10.06.2026; accepted for publication 11.06.2026.

Информация об авторах

Алексей Сергеевич Степанов, доктор фармацевтических наук, главный научный сотрудник, Дальневосточный научно-исследовательский институт сельского хозяйства, ORCID: 0000-0001-8395-8350, Author ID: 247904, stepanfx@mail.ru;

Анна Геннадьевна Тишкова, научный сотрудник, Дальневосточный научно-исследовательский институт сельского хозяйства, ORCID: 0000-0002-4015-814X, Author ID: 1058133, Betula2717@mail.ru;

Артем Сергеевич Бордаков, инженер, Вычислительный центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, ORCID: 0009-0006-4991-7129, Author ID: 1306414, 979artem979@gmail.com

Information about the authors

Alexey S. Stepanov, Doctor of Pharmaceutical Sciences, Chief Researcher, Far Eastern Agricultural Research Institute, ORCID: 0000-0001-8395-8350, Author ID: 247904, stepanfx@mail.ru;

Anna G. Tishkova, Researcher, Far Eastern Agricultural Research Institute, ORCID: 0000-0002-4015-814X, Author ID: 1058133, Betula2717@mail.ru;

Artyom S. Bordakov, Engineer, Computing Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, ORCID: 0009-0006-4991-7129, Author ID: 1306414, 979artem979@gmail.com

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.