

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРИПОЛЕВЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ РАЗВИТИЯ ПОСЕВОВ СОИ ПО ДАННЫМ ДЗЗ И СВОЙСТВАМ ПАХОТНОГО ГОРИЗОНТА (НА ПРИМЕРЕ ЮГА ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА)

© 2024 г. А. С. Степанов¹, доктор фармацевтических наук, Г. В. Харитонов², доктор биологических наук, Т. А. Асеева¹, доктор сельскохозяйственных наук, член-корреспондент РАН, А. Л. Верхотуров³, К. Н. Дубровин³, А. Н. Фролов¹

¹Дальневосточный научно-исследовательский институт сельского хозяйства, Хабаровский Федеральный исследовательский центр ДВО РАН, 680521, Хабаровский край, с. Восточное, ул. Клубная, 13

²Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, Хабаровский Федеральный исследовательский центр ДВО РАН, 680000, Хабаровск, ул. Дикопольцева, 56

³Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровский Федеральный исследовательский центр ДВО РАН, 680000, Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65
E-mail: stepanfx@mail.ru

Оценка неоднородностей развития посевов сельскохозяйственных культур – одно из ключевых условий прогнозирования урожайности и повышения экономической эффективности земледелия. Цель исследования – разработка методов оценки внутриполевых неоднородностей посевов сои на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и определение взаимосвязи между показателями продуктивности сои и характеристиками почвы. Работу проводили на лугово-бурой тяжелосуглинистой почве, для отбора образцов в мае и августе 2023 г. было выбрано 10 участков поля, занятого соей, общей площадью 36,9 га (Хабаровский край). Исследование базировалось на результатах обработки данных ДЗЗ (спутник Sentinel-2, квадрокоптер DJI Mavic3M), оценке показателей продуктивности сои, агрохимических, физико-химических характеристик почв и микро- и макроэлементного состава. Пространственное распределение NDVI, смоделированное по данным Sentinel-2 (начало августа) соответствовало распределению NDVI по данным DJI Mavic3M. Установлена достоверная корреляция значений индекса NDVI в августе 2023 г. с высотой сои ($R = 0,64$) и числом бобов ($R = 0,64$). Влажность почвы имеет положительную корреляционную связь с NDVI ($R = 0,87$) и высотой сои ($R = 0,68$) для всего периода вегетации культуры. Установлена положительная корреляция NDVI с H ($R = 0,79$) и отрицательная – с pH ($R = -0,79$). Содержание $N-NO_3$ находилось в диапазоне от 2,51 до 6,84 мг/кг ($V = 35,12\%$), подвижных форм P_2O_5 – от 2,47 до 6,07 мг/100 г ($V = 33,13\%$), K_2O – от 4,98 до 9,37 мг/100 г ($V = 20,07\%$). Вариабельность содержания $N-NO_3$ и P_2O_5 снизилась к августу до 11,61% и 21,99%. Между первым и вторым отборами проб не отмечали значимых изменений валового состава почвы. Варьирование содержания редкоземельных элементов (Sc, Y, лантаноиды) по выделенным участкам не превышало 5%. К дате второго отбора отмечали достоверное снижение их содержания в почве на 4...10,5% ($p < 0,05$).

INVESTIGATION OF IN-FIELD HETEROGENEITIES IN THE DEVELOPMENT OF SOYBEAN ACCORDING TO REMOTE SENSING DATA AND PROPERTIES OF THE PLOW HORIZON (ON THE EXAMPLE OF THE SOUTH OF THE FAR EAST)

A. S. Stepanov¹, G. V. Kharitonova², T. A. Aseeva¹, A. L. Verkhoturrov³, K. N. Dubrovin³, A. N. Frolov¹

¹Far-Eastern Agriculture Research Institute, Khabarovsk Federal Research Center of FEB RAS, 680521, Khabarovskii krai, s. Vostochnoe, ul. Klubnaya, 13

²Institute of Water and Environmental Problems, Khabarovsk Federal Research Center of FEB RAS, 680000, Khabarovsk, ul. Dikopol'tseva, 56

³Computing Center, Khabarovsk Federal Research Center of FEB RAS, 680000, Khabarovsk, ul. Kim Yu Chena, 65
E-mail: stepanfx@mail.ru

Assessment of crop heterogeneities is one of the key conditions for predicting crop yield and increasing the economic efficiency of farming. The aim of the study is to develop methods for assessing in-field heterogeneities of soybean based on remote sensing data and to determine the relationship between soybean productivity indicators and soil characteristics. The work was carried out on meadow-brown heavy loamy soil, 10 plots of soybean field with a total area of 36.9 ha (Khabarovsk Krai) were selected for sampling in May and August 2023. The research was based on the results of remote sensing data processing (Sentinel-2 satellite, DJI Mavic3M quadcopter), assessment of soybean productivity indicators, agrochemical, physical and chemical characteristics of soils and micro- and macroelement composition. The spatial distribution of NDVI modeled from Sentinel-2 data (early August) corresponded to the distribution of NDVI from DJI Mavic3M data. NDVI index values in August 2023 were found to be significantly correlated with soybean height ($R = 0.64$) and number of beans ($R = 0.64$). Soil moisture has a positive correlation with NDVI ($R = 0.87$) and soybean height ($R = 0.68$) for the entire growing season of the crop. NDVI was positively correlated with H ($R = 0.79$) and negatively correlated with pH ($R = -0.79$). The content of $N-NO_3$ ranged from 2.51 to 6.84 mg/kg ($V = 35.12\%$), mobile forms of P_2O_5 – from 2.47 to 6.07 mg/100 g ($V = 33.13\%$), K_2O – from 4.98 to 9.37 mg/100 g ($V = 20.07\%$). The variability of $N-NO_3$ and P_2O_5 content decreased to 11.61% and 21.99% by August. No significant changes in soil bulk composition were observed between the first and second sampling. Variation of content of rare-earth elements (Sc, Y, lanthanides) in the selected sites did not exceed 5%. By the date of the second sampling a significant decrease by 4–10.5% ($p < 0.05$) in the content of rare earth elements in soil was noted.

Ключевые слова: цифровое земледелие, индекс вегетации, соя (*Glycine max*), дистанционное зондирование, почва, продуктивность.

Keywords: digital farming, vegetation index, Far East, soybean (*Glycine max*), remote sensing, arable land, productivity.

В последние годы переход к точному и цифровому земледелию для повышения урожайности культур в условиях внутриполевой изменчивости развития посевов стал мировым трендом [1, 2]. Эффективным подходом к организации точного земледелия служит количественная оценка вариативности распределения агроэкологических параметров, влияющих на продуктивность сельскохозяйственных культур [1]. К перспективным методам оценки неоднородностей развития посевов относят в первую очередь подходы, основанные на использовании данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Исследования в области поиска зависимостей значений вегетационных индексов (по данным ДЗЗ) и показателей, характеризующих физиологическое состояние посевов, проводятся в Агрофизическом научно-исследовательском институте. По их результатам, например, было установлено, что состояние стресса растений, смоделированное посредством снижения уровня азотного питания и кратковременной почвенной засухи, вызывает изменение значений индексов отражения [3]. Величины оптических индексов, в том числе NDVI, коррелируют с обеспеченностью растений азотом в начале вегетационного цикла, а для дальнейшей оценки обеспеченности азотом перспективнее использовать индексы, характеризующие активность фотосинтеза (ChIRI, WRI и др.) [4]. Другой немаловажный аспект организации точного земледелия – проведение исследований по изучению почвенных характеристик с использованием данных ДЗЗ, в том числе в рамках одного поля [5]. Так, было установлено, что на продуктивность посевов и, в конечном итоге, на урожайность культур влияют такие свойства, как содержание органического вещества, влажность, гранулометрический состав и др. [6, 7]. Они могут быть оценены опосредовано, исходя из спектральной отражательной способности почвы на основе данных космической и аэрофотосъемки.

Для оценки неоднородности посевов в основном используют значения оптических индексов вегетации, полученные при помощи БПЛА [8, 9, 10, 11]. Например, было установлено, что наиболее высокую точность прогнозирования при оценке изменчивости содержания подвижного азота на пастбищах можно достичь при использовании БПЛА, но при некотором снижении точности для этого пригодны и данные Sentinel-2 и Landsat 8/9 [12, 13].

Интенсивное использование пахотных земель, в том числе при выращивании сои – ведущей культуры ДФО, в крайне непростых погодных условиях дальневосточного региона (муссонный характер климата, частые наводнения) вместе с внесением минеральных удобрений может приводить к потере органического вещества (гумуса) и, в конечном итоге, к существенному снижению биологической продуктивности почв [14]. Поэтому особое значение приобретают исследования, направленные на совместный анализ свойств почвы и оценку развития посевов сои, в том числе спутниковыми методами.

Цель исследования – с использованием методов ДЗЗ разработать подходы для оценки внутриполевой неоднородности развития посевов сои и установить возможность определения взаимосвязей между показателями продуктивности сои, агрохимических и физико-химических свойств, а также микро- и макроэлементного состава почв.

Для ее достижения решали следующие задачи:

провести агрохимический анализ почвы, оценить количественное содержание микро- и макроэлементов, сравнить данные космо- и аэрофотосъемки для разных участков поля с посевами сои;

построить карты пространственного распределения значений NDVI, агрохимических показателей, показателей продуктивности сои и физико-химических характеристик почвы;

оценить корреляционные зависимости между характеристиками почвы, показателями продуктивности сои и значениями NDVI.

Условия, материалы и методы. Работу проводили в 2023 г. на одном из опытных полей ДВ НИИСХ (правый берег Амура, окрестности г. Хабаровска) площадью 36,9 га (рис. 1). В эксперименте выращивали сорт сои Марината. Посев проводили 29–30 мая с предпосевным внесением минерального удобрения Фертим (Fertim) NPS+Ca 9:14:10+26. Почва опытного участка лугово-бурая тяжелосуглинистая с низким естественным плодородием, обусловленным повышенной кислотностью и незначительным содержанием питательных элементов [15]. Содержание гумуса в почве опытного поля составляло 3,3% (по Тюрину), подвижного фосфора (P_2O_5) и калия (K_2O) – 3,8 мг/100 г и 6,9 мг/100 г (по Кирсанову), рН почвы – 4,8 (потенциометрическим методом).

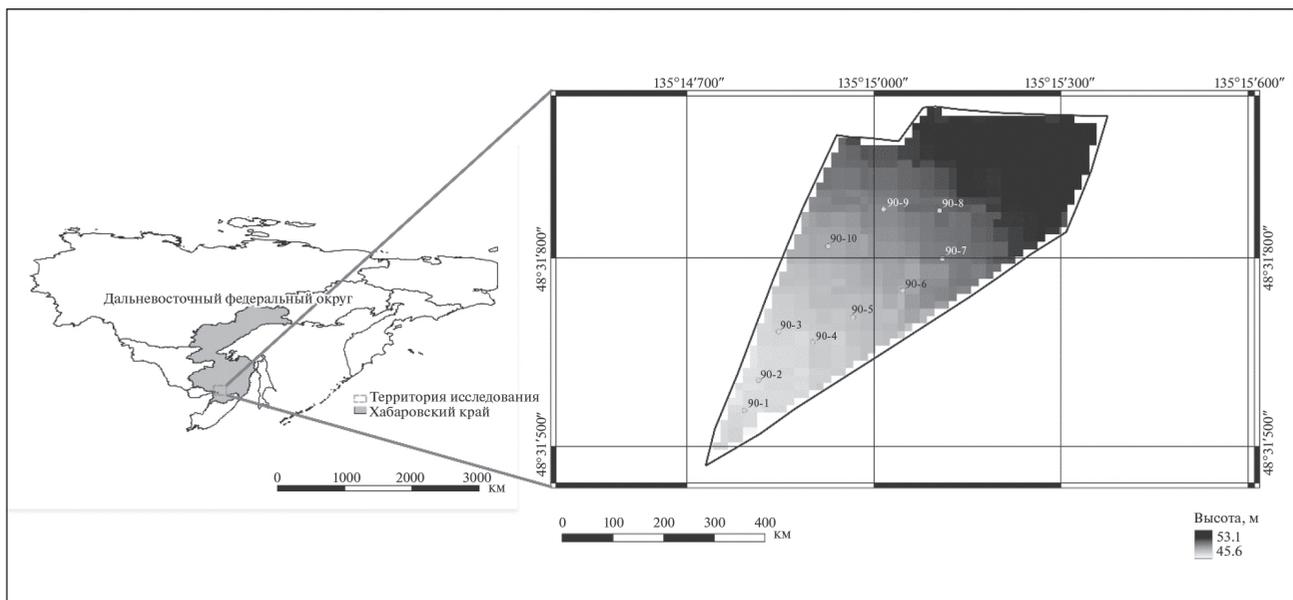


Рис. 1. Область исследования с участками отбора почвенных проб.

На исследуемом поле выделяли 10 участков площадью 10 м², из пахотного горизонта (глубина 0...30 см) которых 24.05.2023 и 03.08.2023 отбирали по пять точечных проб, далее для каждого участка формировали объединенные пробы.

В почвенных образцах содержание нитратного азота (N-NO₃, мг/кг) и величину pH определяли потенциометрическим методом; гидродолитическую кислотность (H_v, мг-экв/100 г) – методом Каппена; содержание подвижного фосфора (P₂O₅, мг/100 г) и калия (K₂O, мг/100 г) – методом Кирсанова; влажность – по ГОСТ 28268-89.

Оценку содержания макро- и микроэлементов в почвенных образцах проводили методом рентгено-флуоресцентного анализа (РФА, S4 Pioneer (Bruker, AXS)) и масс-спектрометрическим методом с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS ELAN-9000 (PerkinElmer)). Определяли валовые содержания оксидов (SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, CaO, MgO, Na₂O, K₂O, P₂O₅) и химических элементов (Li, B, P, Sc, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Sr, Y, Mo, Cd, Sb, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hg, Pb, Bi).

На каждом из исследуемых участков определяли следующие показатели продуктивности сои: высота растения, см (h, см); высота прикрепления первого узла, см; количество узлов на растении, шт (X_{узлов}, шт); количество бобов на одном растении, шт (X_{бобов}, шт); количество семян с одного растения, шт (X_{семян}, шт); масса семян с растения, г (m_{семян}, г); масса 1000 семян, (m_{1000семян}, г).

Карты пространственного распределения характеристик почвенных образцов и продуктивности сои строились в SAGA с использованием метода универсального кригинга.

Значения вегетационного индекса NDVI для каждого пикселя рассчитывали после обработки изображений уровня L2A, полученных со спутников Sentinel-2 с разрешением 10 м 07.08.2023, 03.09.2023 и 04.10.2023 по формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

где NIR и RED – значения спектральной отражательной способности в ближнем инфракрасном и красном диапазонах соответственно.

Кроме того, съемку исследуемого поля проводили с использованием DJI Mavic3M (21.08.2023, 28.09.2023). Значения NDVI для всех пикселей поля рассчитывали с использованием Metashape, полученные значения усредняли до пикселя 1 м, а также для выбранных участков 10 м².

Анализ данных на соответствие нормальному распределению проводили с помощью критерия Шапиро–Уилка. Зависимости между показателями выявляли с использованием коэффициентов корреляции: для нормально распределенных данных – Пирсона (R); для не нормально распределенных данных – Спирмена (R_s). Оценку значимости различий между средними величинами для показателей, полученных при первом и втором отборе проб, для нормально распределенных данных проводили с использованием t-критерия Стьюдента; для данных, не подчинявшихся закону нормального распределения – U-критерия Манна–Уитни.

Результаты и обсуждение. При первом отборе почвенных образцов содержание подвижных форм P₂O₅ и K₂O на всем поле находилось в диапазоне соответственно от 2,47 до 6,07 мг/100г (V = 33,13%) и от 4,98 до 9,37 мг/100г (V = 20,07%). Содержание N-NO₃ в почве в конце весны до использования удобрений

Табл. 1. Варьирование показателей продуктивности сои и агрохимических характеристик почвы (август 2023 г.)

Показатель	N-NO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	h, см	X _{узлов} [*] , шт.	X _{бобов} [*] , шт.	X _{семян} [*] , шт.	m _{семян} [*] , г
X _{мин}	4,13	2,51	2,57	64	10	21	47	8
X _{макс}	6,45	4,50	4,96	79	12	32	72	12
X _{ср}	5,39	3,10	3,27	69,4	10,7	24,6	53,6	8,9
V, %	11,61	21,99	24,14	6,77	–	12,88	–	–

*значения показателя не соответствуют нормальному распределению (p < 0,05).

также отличалось достаточно высокой вариабельностью (X_{мин} = 2,51 мг/кг, X_{макс} = 6,84 мг/кг, V = 35,12%). Внесение удобрений позволило снизить вариативность содержания N-NO₃ и P₂O₅ до 11,61% и 21,99% соответственно. Известно, что применение азотных удобрений с усредненной нормой по полю снижает вариабельность внутрипольного содержания N-NO₃ [16]. Логичным эффектом от применения удобрений стало и выравнивание вариативности подвижных форм фосфора, а отсутствие аналогичной картины по калию можно объяснить составом удобрения. Корреляционных связей между содержанием N-NO₃, P₂O₅ и K₂O для разных участков поля выявлено не было.

Валовое содержание макроэлементов и их варьирование соответствовали естественным для рассматриваемого типа почва (табл. 2). Не были отмечены и значимые изменения величин этих показателей как для участков,

Табл. 2. Варьирование показателей пахотного горизонта почвы исследуемого поля (валовой состав, август 2023 г.), % на воздушно-сухое вещество

Показатель	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
X _{мин} , %	64,42	0,83	13,38	4,80	0,08	0,91	0,84	1,33	2,23	0,19
X _{макс} , %	70,19	0,88	14,79	5,63	0,25	1,22	1,02	1,56	2,38	0,26
X _{ср} , %	68,46	0,87	14,25	5,04	0,14	1,01	0,96	1,48	2,33	0,22
V, %	2,54	1,82	3,22	5,03	35,99	9,94	5,21	4,71	2,57	8,57

так и для поля в целом, в период между первым и вторым отборами проб. Наиболее высокая доля макроэлементов приходилась на SiO₂ (68,5% на воздушно-сухое вещество) и Al₂O₃ (14,3% на воздушно-сухое вещество).

Повышенное валовое содержание F₂O₃ и MnO может свидетельствовать о формировании в пахотном горизонте железомарганцевых конкреций, которые могут играть роль геохимических «барьеров» и аккумулировать поступающие из фосфорных удобрений токсичные микроэлементы, что предотвращает их попадание в конечную продукцию [17].

Варьирование среднего содержания редкоземельных элементов (РЗЭ) по выделенным участкам не было значительным и не превышало 5%. Для некоторых микроэлементов (например, Co, Mo, а в особенности Sr и Mn) наблюдали существенный разброс значений. Содержание микроэлементов (Zn, Cu, Pb, Co, Mo, Ni) для исследуемой территории находилось в пределах кларка, соответствующего рассматриваемому типу почв дальневосточного региона [18]. В пахотном горизонте было установлено повышенное содержание мышьяка (до 10 мг/кг). С одной стороны, это могло быть обусловлено геохимическими особенностями глинистых пахотных почв региона, с другой – результатом длительного использования фосфорных удобрений.

В периоде между первым и вторым отбором отмечено статистически значимое снижение содержания большинства РЗЭ и микроэлементов в почве (табл. 4). Относительное уменьшение показателя находилось в диапазоне от 4 до 10,5% для РЗЭ. Снижение содержания РЗЭ в пахотном горизонте могло быть вызвано как аккумулярованием элементов в сое, так и их вымывани-

Табл. 3. Варьирование показателей пахотного горизонта почвы исследуемого поля (микроэлементный состав, август 2023 г.)

Элемент	X_{cp} , мг/кг	V , %
Li	31,8	1,5
B*	8,4	7,27–9,45
P*	802	691–921
V	81,5	2,5
Cr	102,3	13,3
Mn*	820,8	554–1070
Co	13,2	7,9
Ni	22	6,1
Cu*	23,2	18,3–26,8
Zn*	66,9	63,0–73,9
As*	9,2	8,9–9,6
Sr	143,6	3,1
Mo	1,4	7,8
Cd*	0,04	0,03–0,04
Sb*	0,9	0,89–0,97
Ba	529,9	1,6
Hg*	0,1	0,07–0,12
Pb	23,9	1,7
Sc	9,4	2,3
Y	13,9	4
La	28,1	2,3
Ce	59	2,5
Pr	6,5	2,2
Nd	23,3	2,2
Sm	4,5	1,9
Eu	0,9	2,1
Gd	4,6	2,6
Tb	0,6	2,4
Dy	3	3,4
Ho	0,6	3,6
Er	1,6	3,8
Tm	0,2	3,7
Yb	1,4	2,8
Lu	0,2	4,4

*значения показателя не соответствуют нормальному распределению ($p < 0,05$).

ем из пахотного слоя. При этом, по данным некоторых исследователей, РЗЭ оказывают определенное влияние на урожайность сельскохозяйственных культур [19].

Табл. 4. Оценка изменений микроэлементного состава* почвы в период с мая по август 2023 г.

Элемент	ΔX_{cp} , мг/кг	ΔX_{cp} , %
Li	-1,62	-4,9
B**	-1,18	-12,4
V	-3,55	-4,2
Cr	19,72	23,9
Zn**	-20,09	-23,1
Sr	-6,33	-4,2
Mo	0,18	15
Cd**	-0,02	-17,7
Sc	-0,4	-4,1
Y	-1,44	-9,4
La	-2,42	-7,9
Ce	-5,27	-8,2
Pr	-0,58	-8,2
Nd	-2,56	-9,9
Sm	-0,43	-8,6
Eu	-0,06	-6
Gd	-0,3	-6,1
Tb	-0,03	-4,5
Dy	-0,18	-5,8
Ho	-0,03	-5,3
Er	-0,16	-9,1
Tm	-0,02	-6,9
Yb	-0,16	-10,5
Lu	-0,02	-8,2

*представлены только статистически значимые изменения (для нормально распределенных величин $t < t_{кр}$, для ненормально распределенных – с $U \leq U_{табл}$ при $p < 0,05$);

**значения показателя не соответствуют нормальному распределению ($p < 0,05$).

Однако в ходе наших исследований таких связей между величинами этих показателей не выявлено.

Пространственное распределение NDVI (включая зоны с высокими значениями индекса), смоделированное по данным Sentinel-2, в период налива семян (начало августа) соответствовало распределению NDVI, полученному по данным DJI Mavic3M (рис. 2). В то же время карта распределения NDVI, сформированная по данным аэрофотосъемки от 28.09.23, не полностью соответствовала карте, построенной по спутниковым данным за 04.10.23. Это объясняется тем, что, во-первых, пространственная изменчивость значений NDVI осенью значительно выше, чем в период максимума вегетации. Во-вторых, продолжительность временного интервала между датами аэро- и спутниковой съемки в осенний период также оказывает более значительное влияние на численные значения вегетационного индекса.

Установлена значимая корреляция между величинами NDVI, рассчитанными для пикселя 10 м (Sentinel-2, 07.08) и усредненными значениями NDVI в этом же пикселе (DJI Mavic3M, 21.08). Кроме того, необходимо отметить положительную корреляцию между соответствующими показателями, полученными по изображениям DJI Mavic3M от 21.08 и Sentinel-2 от 07.08 ($R = 0,41$), а также DJI Mavic3M от 28.09 и Sentinel-2 от 03.10 ($R = 0,61$), что свидетельствует о возможности использования спутниковых данных для оценки внутри-полевых неоднородностей.

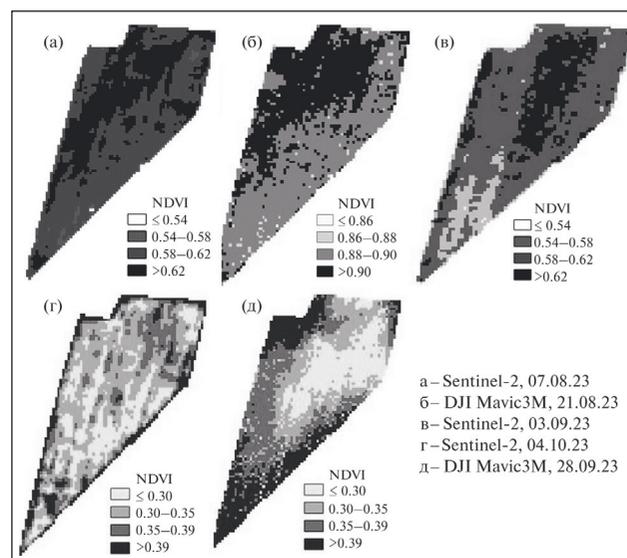


Рис. 2. Пространственное распределение значений NDVI для поля с соей по данным космо- и аэрофотосъемки.

Достаточно широко известно о прямой корреляционной связи между показателями продуктивности сельскохозяйственных культур и значениями NDVI в период максимума вегетации [20]. В наших исследованиях 21.08 индекс NDVI имел достоверную корреляцию (табл. 6) с высотой растений сои (0,64) и числом бобов на растении (0,64). Связь с другими показателями продуктивности также была достаточно высокой. В работе [21] было установлено, что влажность почвы оказывает существенное влияние на урожайность яровой пшеницы. В нашем исследовании влажность почвы имела положительную корреляционную связь с NDVI (0,87), а также высотой сои (0,68) для всего периода вегетации культуры. Кроме того, выявлена положительная корреляция (0,79) NDVI с гидролитической кислотностью (H_T) и отрицательная (-0,79) – с pH почвы. Отрицательная

Табл. 5. Коэффициенты корреляции между значениями NDVI для разных видов и дат съемки

Наименование	NDVI 21.08 DJI	NDVI 07.08 Sent	NDVI 05.09 Sent	NDVI 28.09 DJI
NDVI 07.08 Sent	0,96	1,00		
NDVI 05.09 Sent	0,41	0,39	1,00	
NDVI 28.09 Sent	-0,70	-0,72	-0,57	1,00
NDVI 04.10 Sent	-0,55	-0,66	-0,35	0,61

*верхний индекс соответствует дате съемки, нижний индекс – тип съемки (спутник Sentinel или БПЛА DJI Mavic3M).

корреляция между NDVI и содержанием подвижного калия и подвижного фосфора, скорее всего, была обусловлена типом применявшегося удобрения. Обратная корреляция NDVI с подвижным фосфором была также подтверждена работами некоторых исследователей [22].

Анализ карт пространственного распределения показателей продуктивности, а также агрохимических и физико-химических свойств почвы свидетельствует о том, что зоны высокой продуктивности, повышенной влажности и сниженной кислотности находились в северной части поля (рис. 3). Наибольшее содержание подвижного фосфора и калия было, напротив, характерно для южной части поля. Распределение N-NO₃ имело менее вариативный характер, при этом максимальные значения соответствовали центральной части опытного поля, несколько меньшие – северной части. Сравнение карт с пространственным распределением NDVI также позволило выявить соответствие зон высокой продуктивности зонам высоких значений NDVI (в частности, северная часть поля).

Выводы. Содержание микро- и макроэлементов в почве опытного поля сои в целом соответствовало характерным показателям для лугово-бурых тяжелосуглинистых почв. Его вариабельность для N-NO₃ при первом отборе составляла 35,12%, P₂O₅ – 33,13%, K₂O – 20,07%. После внесения удобрений она снизилась для N-NO₃ до 11,61%, P₂O₅ – до 21,99%. Между отборами проб не отмечены значимые изменения валового состава почвы. Варьирование содержания редкоземельных элементов по выделенным участкам не превышало 5%, при этом установлено достоверное снижение содержания редкоземельных элементов в почве к периоду второго отбора образцов.

Построены карты пространственного распределения NDVI по данным Sentinel-2 и DJI Mavic3M. Установлено соответствие областей внутривидовых неоднородностей посевов сои по данным спутниковой и аэрофотосъемки. Зона высокой продуктивности сои находилась в северной части поля, что соответствует зонам повышенной влажности и сниженной кислотности, а также повышенным значениям NDVI, что дает

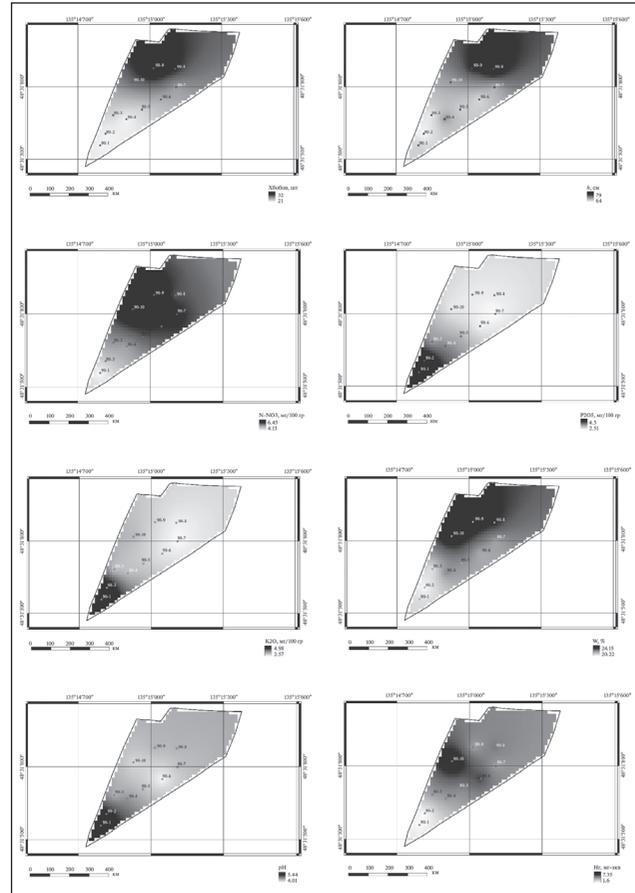


Рис. 3. Карты пространственного распределения агрохимических и физико-химических характеристик поля, а также показателей продуктивности сои.

возможность сделать заключение о необходимости дифференцированного внесения удобрений для повышения средней урожайности.

Установлена достоверная корреляция значений индекса NDVI в августе 2023 г. с высотой сои ($R = 0,64$) и числом бобов ($R = 0,64$), влажностью почвы с NDVI ($R = 0,87$) и высотой сои ($R = 0,68$) для всего периода вегетации культуры, NDVI с величиной pH ($R = -0,79$), а также отрицательная связь NDVI с величиной pH ($R = -0,79$). Таким образом, индекс NDVI, рассчитанный по данным космо- и аэрофотосъемки может использоваться для оценки неоднородностей развития посевов сои и, в конечном итоге, для корректировки прогноза урожайности, выявления проблемных участков поля и дифференцированного внесения удобрений в дальнейшем.

Табл. 6. Коэффициенты корреляции между значениями NDVI, характеристиками почвы и показателями продуктивности посевов сои

Наименование	NDVI 21.08 DJI	N-NO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	h, см	*X _{узлов} , шт.	X _{бобов} , шт.	*X _{семян} , шт.	*m _{семян} , г	W, %	pH
N-NO ₃	0,61	1,00									
P ₂ O ₅	-0,80**	-0,57	1,00								
K ₂ O	-0,69	-0,64	0,90	1,00							
h, см	0,64	0,71	0,11	-0,04	1,00						
*X _{узлов} , шт.	0,53	0,04	-0,22	-0,04	0,22	1,00					
X _{бобов} , шт.	0,64	0,29	-0,33	-0,17	0,48	0,87	1,00				
*X _{семян} , шт.	0,58	0,20	-0,23	-0,10	0,44	0,88	0,91	1,00			
*m _{семян} , г	0,49	-0,17	-0,24	-0,08	0,34	0,78	0,84	0,96	1,00		
W, %	0,87	0,56	-0,62	-0,42	0,68	0,31	0,52	0,45	0,40	1,00	
pH	-0,79	-0,73	0,88	0,90	-0,33	-0,09	-0,27	-0,15	-0,13	-0,58	1,00
H _г , мг-экв/100 г	0,79	0,73	-0,85	0,84	0,28	0,14	0,27	0,13	0,08	0,59	-0,98

*для соответствующих показателей рассчитывались значения R_г для остальных – R;

**жирным шрифтом выделены статистически значимые коэффициенты корреляции.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект 23–76–00007.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Теоретические основы дистанционной и наземной количественной оценки внутривидовой изменчивости для точного земледелия / В. П. Якушев, Ю. И. Блохин, С. Ю. Блохина и др. Санкт-Петербург: АФИ, 2023. 75 с.
2. Научно-обоснованный прогноз развития точного земледелия в России / Е. В. Рудой, М. С. Петухова, С. В. Рюмкин, Е. В. и др. Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2021. 138 с.
3. Новые возможности автоматизации процесса обнаружения внутривидовой неоднородности по гиперспектральным снимкам и оптическим критериям / В. П. Якушев, Е. В. Канаиш, В. В. Якушев и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 24–32.
4. Якушев В. П., Канаиш Е. В., Русаков Д. В. Корреляционные зависимости между вегетационными индексами, урожаем зерна и оптическими характеристиками листьев пшеницы при разном содержании в почве азота и густоте посева // Сельскохозяйственная биология. 2022. Т. 57. № 1. С. 98–112.
5. Прудникова Е. Ю., Савин И. Ю., Грубина П. Г. Спутниковая оценка агрономически важных свойств пахотных почв с учетом состояния их поверхности // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. 2023. Вып. 115. С. 129–159.
6. Технологии составления и обновления почвенных карт / И. Ю. Савин, В. С. Столбовой, А. Л. Иванов и др. М.: Перо, 2019. 328 с.
7. Виндекер Г. В., Прудникова Е. Ю., Савин И. Ю. Трансформация открытой поверхности почв под воздействием осадков в модельном эксперименте // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. 2018. Вып. 95. С. 23–40.
8. Leroux C., Tisseyre B. How to measure and report within-field variability: a review of common indicators and their sensitivity // Precision Agriculture. 2019. Vol. 20. P. 562–590.
9. Comparison of PlanetScope, Sentinel-2, and Landsat 8 data in soybean yield estimation within-field variability with random forest regression / K. Amankulova, N. Farmonov, P. Akramova, et al. // Heliyon. 2023. Vol. 9. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844023046406?via%3Dihub> (дата обращения: 12.03.2024).
10. Maes W. H., Steppe K. Perspectives for Remote Sensing with Unmanned Aerial Vehicles in Precision Agriculture Trends // Plant Science. 2019. Vol. 24. No. 2. P. 152–164.
11. The potential of UAV-borne spectral and textural information for predicting aboveground biomass and N fixation in legume-grass mixtures / E. Grüner, M. Wachendorf, T. Astor, et al. // PLoS One. 2020. Vol. 15. No. 6. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0234703> (дата обращения: 12.02.2024).
12. Nitrogen variability assessment of pasture fields under an integrated crop-livestock system using UAV, PlanetScope, and Sentinel-2 data / F. Pereira, J. P. de Lima, R. G. Freitas, et al. // Computers and Electronics in Agriculture. 2022. Vol. 193. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169921006621?via%3Dihub> (дата обращения: 15.03.2024).
13. An overview of crop nitrogen status assessment using hyperspectral remote sensing: current status and perspectives / Y. Fu, G. Yang, R. Pu, et al. // European Journal of Agronomy. 2021. Vol. 12. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030121000137> (дата обращения: 14.01.2024).
14. Наумченко Е. Т., Банецкая Е. В. Влияние длительного применения удобрений на плодородие луговой черноземовидной почвы и урожайность сои // Агрохимия. 2022. № 2. С. 28–33.
15. Изменение химических и микробиологических свойств почвы при антропогенном воздействии в полево севообороте / Н. А. Селезнева, А. Г. Тишкова, Т. Н. Федорова и др. // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34. № 6. С. 5–10.
16. Шерстобитов С. В., Абрамов Н. В. Влияние почвенной неоднородности и внесения усредненной нормы азотных удобрений на урожайность яровой пшеницы // Вестник КрасГАУ. 2020. № 5. С. 93–99.
17. Тимофеева Я. О., Голов В. И. Железо-марганцевые конкреции как накопители тяжелых металлов в некоторых почвах Приморья / Я. О. Тимофеева, В. И. Голов // Почвоведение. 2007. № 12. С. 1463–1471.
18. Тимофеева Я. О. Микроэлементы в различных типах почв агрохимических стационаров // Вестник КрасГАУ. 2011. № 2. С. 37–41.
19. Review of Rare Earth Elements as Fertilizers and Feed Additives: A Knowledge Gap Analysis / F. Tommasi, P. J. Thomas, G. Pagano, et al. // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 2021. Vol. 81. No. 4. P. 531–540.
20. Использование вегетативного индекса NDVI для прогноза урожайности зерновых культур / С. А. Родимцев, Н. Е. Павловская, С. В. Вершинин и др. // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2022. № 4(65). С. 56–67.
21. Гопн Н. В., Савенков О. А. Связь показателя NDVI и урожайности яровой пшеницы со свойствами пахотного горизонта черноземов глинисто-иллювиальных элювирированных и темно-серых почв // Почвоведение. 2019. № 3. С. 377–386.
22. Использование NDVI в цифровом картографировании содержания фосфора в почвах и оценка обеспеченности им растений / Н. В. Гопн, О. А. Савенков, Т. В. Нечаева и др. // Исследование Земли из космоса. 2019. № 2. С. 65–73.

Поступила в редакцию 24.05.2024
 После доработки 19.06.2024
 Принята к публикации 16.07.2024