

СВЯЗЬ ПОКАЗАТЕЛЯ NDVI И УРОЖАЙНОСТИ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ СО СВОЙСТВАМИ ПАХОТНОГО ГОРИЗОНТА ЧЕРНОЗЕМОВ ГЛИНИСТО-ИЛЛЮВИАЛЬНЫХ ЭЛЮВИРОВАННЫХ И ТЕМНО-СЕРЫХ ПОЧВ

© 2019 г. Н. В. Гопп¹, *, О. А. Савенков¹

¹Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Россия, 630090, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 8/2

*e-mail: natalia.gopp@gmail.com

Поступила в редакцию 28.06.2016 г.

После доработки 18.04.2018 г.

Принята к публикации 26.09.2018 г.

На территории Предсалаирской дренированной равнины изучена связь урожайности яровой пшеницы и NDVI с физическими и химическими свойствами агрочерноземов глинисто-иллювиальных элювирированных и агротемно-серых почв. В регрессионной модели показатель NDVI объяснил 85% вариации урожайности яровой пшеницы. С использованием полученной модели и базовой основы пространственного распределения NDVI осуществлен прогноз и визуализация пространственной изменчивости урожайности яровой пшеницы. Выявлено, что урожайность яровой пшеницы и NDVI на агротемно-серой почве статистически значимо не отличались от соответствующих показателей на агрочерноземе, который характеризовался более высоким плодородием. Установлена заметная положительная корреляционная связь урожайности яровой пшеницы и NDVI с предпосевной влажностью ($r = 0.52$; $r = 0.57$) и содержанием обменного калия ($r_s = 0.58$; $r_s = 0.61$), умеренная связь с гумусом ($r = 0.35$; $r = 0.38$), легкоподвижным фосфором ($r_s = 0.32$; $r_s = 0.35$) и подвижным цинком ($r_s = 0.42$; $r_s = 0.48$). Выявлено сравнительно высокое содержание подвижных форм макро- и микроэлементов в почвах с более высокими значениями предпосевной влажности.

Ключевые слова: агрочернозем (Chernozems), агротемно-серая почва (Phaeozems), Landsat 8, макроэлементы, микроэлементы, гумус, влажность, азот, фосфор, калий, кальций, магний, цинк, медь, марганец, кобальт

DOI: 10.1134/S0032180X19030055

ВВЕДЕНИЕ

В производстве яровой пшеницы величина урожая и его качество в значительной степени зависят от почвенных свойств. Поэтому в технологиях “точного земледелия” управление продукционным процессом растений проводится с учетом внутрипольной вариабельности свойств почв, что позволяет устранить причины неравномерной урожайности. Еще в 1840 г. известный агрохимик Ю. Либих пришел к заключению: “Если в почве и атмосфере один из элементов, участвующих в питании растений, находится в недостаточном количестве или не обладает достаточной усвояемостью, растение не развивается или развивается плохо. Элемент, полностью отсутствующий или не находящийся в нужном количестве, препятствует прочим питательным соединениям произвести их эффект или, по крайней мере, уменьшает их питательное действие” [19]. Из этого следует, что почва, обеспечивающая сбалансированное питание растений, и оптимальные агроклиматические

условия будут способствовать стабильному получению урожаев сельскохозяйственных культур. Погодные условия не поддаются регулированию, однако изучение почвенных свойств и их связей с показателями урожайности, а также поддержание положительного баланса питательных элементов в почве — задачи вполне осуществимые, как для науки, так и в сельскохозяйственном производстве. Пространственная изменчивость свойств почв обуславливает неодинаковую обеспеченность сельскохозяйственных растений питательными веществами [20], в связи с чем наблюдается закономерное изменение урожайности сельскохозяйственных культур [15, 25, 33, 42]. Известно, что варьирование различных почвенных свойств существенно связано с типом почвы [5–11, 15, 30, 35]. Однако и в пределах типа свойства почв могут иметь значительную вариабельность [29]. Поэтому исследования, направленные на выяснение причин пространственной неоднородности урожайности культур в зависимости от свойств

различных почв являются актуальными и позволяют выработать решения по оптимизации минерального питания растений.

Современные спутниковые данные позволяют получать более содержательную информацию о количественных характеристиках растительности, которые находят свое применение при изучении пространственной изменчивости продуктивности растений и являются базовой картографической основой для моделирования. Показатель NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) является индикатором изменения состояния и продуктивности растений в пространственном и временном измерении [2–4, 6, 14, 26–28, 32, 34, 38, 40, 41]. Показано, что NDVI дает возможность получать количественные оценки проективного покрытия почвы растительностью, оценивать состояние растений, а также чувствителен к изменениям свойств почв и является достаточно информативным показателем для комплексной оценки продукционного потенциала растительного покрова территорий [31]. Установлено, что NDVI является косвенным индикатором актуального плодородия и применяется для составления цифровых карт свойств почв [7, 27]. Использование NDVI для этих целей связано с некоторыми ограничениями, к которым относятся: погодные условия, видоспецифичность различных растений, засоренность посевов, воздействие вредителей и болезней, фаза развития растений, короткий интервал времени, в течение которого определяется величина сезонного максимума NDVI, краткосрочность периода, в течение которого возможно использование регрессионной модели зависимости тестируемых переменных (характеристики растительности или почв) от NDVI.

Цели исследования: 1 – изучить связь урожайности яровой пшеницы и NDVI со свойствами пахотного горизонта агрочерноземов (отдел гумусово-аккумулятивных) и агротемно-серых (отдел текстурно-дифференцированных) почв; 2 – осуществить прогноз пространственной изменчивости урожайности яровой пшеницы по базовой картографической основе пространственного распределения показателя NDVI, рассчитанного по спутниковому снимку Landstat 8 (разрешение 30 м); 3 – провести сравнительный анализ физических и химических свойств пахотного горизонта почв, показателя NDVI и урожайности яровой пшеницы произрастающей на разных типах почв.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводили в мае и сентябре 2015 г. на территории Предсалаирской дренированной равнины (с. Елбаша, Искитимский район, Новосибирская обл.). Согласно Орлову [22], территория Предсалаирья представлена денудационно-аккумулятивным типом рельефа, харак-

теризующимся большой глубиной вреза рек и балок (75–100 м) и существенной протяженностью склонов.

Обследованный участок пашни площадью 112 га находится в пределах водосборных бассейнов рек Малый Елбаш и Сориха (рис. 1). Приводо-раздельные склоны по обобщенной классификации Звонковой [13] в большей степени покатые (уклон 3°–5°) и в меньшей степени пологие (уклон 1°–3°), что определяет существенно значительную и слабую степень опасности развития эрозии. Экспозиция склонов на территории исследования различная, преимущественно юго-восточная, южная, юго-западная, северо-западная, северо-восточная.

Почва водораздельной территории и склонов южной экспозиции (рис. 2) имеет формулу профиля: PU–AUel–BI–BCca–Cca и, согласно классификации почв России [16, 23], относится к агрочернозему глинисто-иллювиальному элювированному, а по международной классификации WRB [37] – к Luvisc Greyzemic Chernozems (Siltic, Aric, Pachic). Почва на эрозионно опасных склонах различной экспозиции имеет формулу профиля: PU–AUel–BEL–BT–C и, согласно классификации почв России [16, 23], относится к агротемно-серой, а по международной классификации WRB [37] – к Luvisc Retic Greyzemic Phaeozems (Siltic, Aric). Ранее, согласно классификации почв СССР [17], изучаемые почвы относились к черноземам оподзоленным и темно-серым лесным почвам. Почвообразующие породы – лёссовидные карбонатные суглинки.

В мае, на момент отбора образцов, почва подготавливалась для посева яровой пшеницы (*Triticum aestivum*) сорта Новосибирская-15, проводилась обработка почвы бороной дисковой тяжелой БДТ-3. Координаты точек опробования определяли с помощью системы геопозиционирования (GPS, Garmin eTrex Vista), погрешность привязки – 15 м. Отбор индивидуальных почвенных проб ($n = 48$) проводили по нерегулярной сетке (рис. 1, 2) из агротемногумусового горизонта (0–30 см). В этом горизонте почв сосредоточена основная масса корней (60–75%) [18].

Пробы почв проанализированы на содержание гумуса мокрым сжиганием по Тюрину, физической глины – по Качинскому, pH водной суспензии – потенциометрическим методом, нитратного азота – по Карпинскому–Замятиной (экстрагент 0.03 М K₂SO₄), подвижного фосфора – по Чирикову (экстрагент 0.5 М CH₃COOH), легкоподвижного фосфора – по Карпинскому–Замятиной (экстрагент 0.03 М K₂SO₄) [1]. Обменные катионы (кальций, магний) и подвижные формы микроэлементов (медь, цинк, марганец, кобальт) извлекали ацетатно-аммонийным буферным раствором (1 М CH₃COONH₄, pH 4.8) с

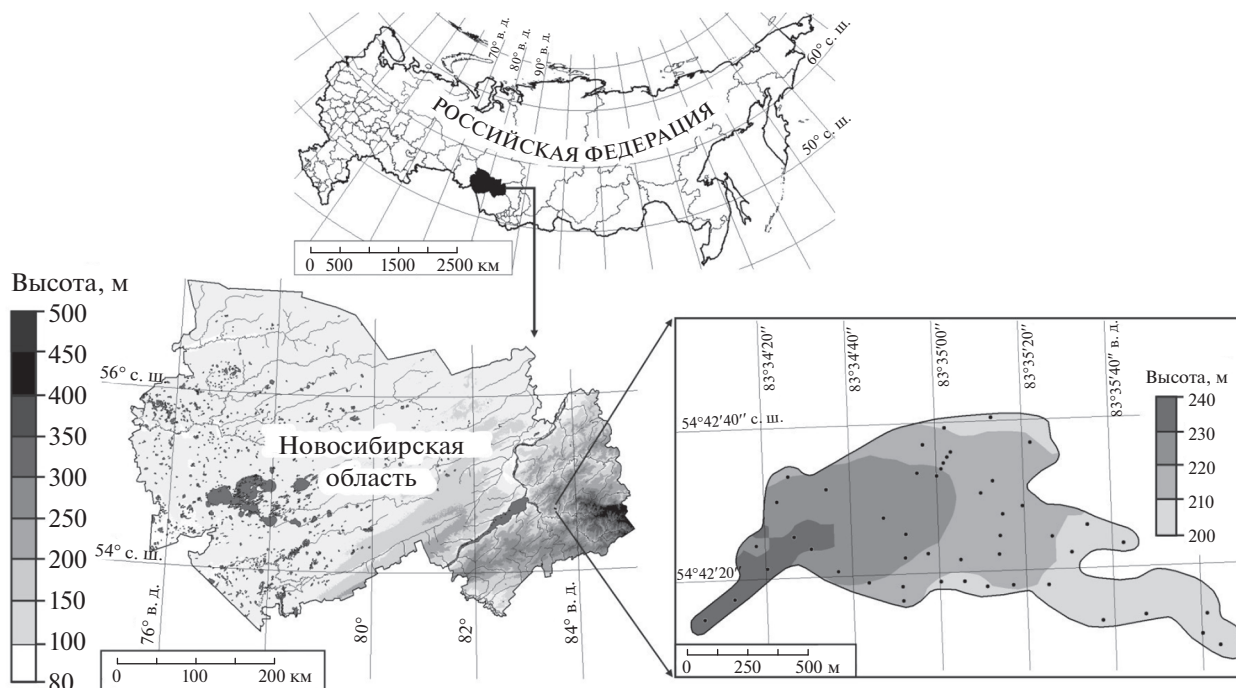


Рис. 1. Карта территории исследования и схема отбора почвенных проб (показана точками).

последующим определением на атомно-абсорбционном спектрометре “Квант-2А”. Цифровые карты физических и химических свойств почв составили с использованием программного обеспечения Variowin 2.2., Surfer 8.0., ENVI 5.0.

Определение урожайности яровой пшеницы проводили в сентябре (в тех же точках, где производился отбор образцов почвы в мае) в двухкратной повторности методом укосов с учетной площади 0.25 м² (50 × 50 см), с последующим высушиванием и взвешиванием зерна. NDVI посевов яровой пшеницы рассчитывали по многозональному снимку Landsat 8 (разрешение 30 м, снимок от 25.06.2015 г.) в программе ENVI 4.0 по следующей формуле [36, 39]:

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

где NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра; RED – отражение в красной области спектра.

Значения NDVI измеряются в дискретной шкале от –1 до 1. Предварительно снимок подвергался атмосферной коррекции в модуле ACM (Atmospheric Correction Module), подмодуль FLAASH (программное обеспечение ENVI).

Анализ данных на соответствие нормальному распределению проведен с помощью критерия Шапиро–Уилка. Корреляционный анализ проводили с использованием коэффициентов корреляции: для нормально распределенных данных –

Пирсона (*r*); для ненормально распределенных данных – Спирмена (*r_s*). Оценку значимости отличий средних между показателями растительности и свойствами различных почв проводили с использованием критериев: для нормально распределенных данных – *t*-критерия Стьюдента; для ненормально распределенных данных – *U*-критерия Манна–Уитни.

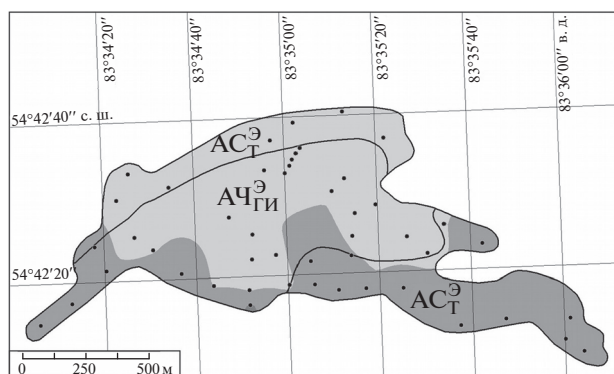


Рис. 2. Почвенная карта (составлена с использованием данных ЗАПСИБГИПРОЗЕМ, масштаб оригинала карты 1 : 25 000) [24]. Точками показаны места отбора почвенных проб. Светло-серым цветом обозначен среднесуглинистый гранулометрический состав, темно-серым – тяжелосуглинистый. Почвы: АЧГІᐚ – агрочернозем глинисто-иллювиальный элювированный насыщенный среднегумусированный; АСᐚ – агротемно-серая элювированная насыщенная среднегумусированная.

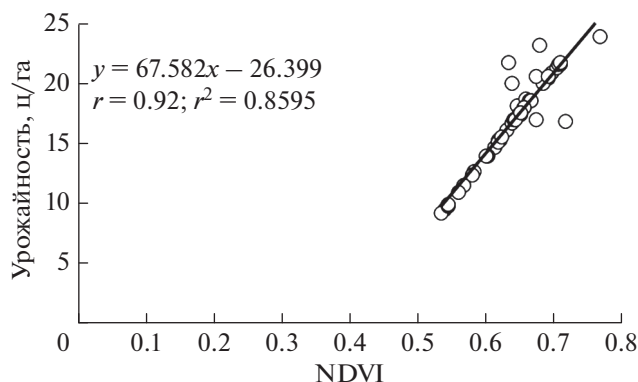


Рис. 3. Зависимость между урожайностью яровой пшеницы и показателем NDVI.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Установленная зависимость между урожайностью яровой пшеницы и показателем NDVI, а также полученное уравнение регрессии (рис. 3), позволили построить карту урожайности яровой пшеницы на все обследуемое поле (рис. 4). Согласно коэффициенту корреляции ($r = 0.92$), положительная связь между исследуемыми параметрами говорит о большей урожайности пшеницы на участках с повышенными значениями NDVI. Показатель NDVI объяснил 85% вариации урожайности яровой пшеницы (табл. 1).

Согласно F -критерию и его вероятности (p) модель и ее коэффициент детерминации статистически значимы ($\alpha = 0.05$), так как $F_{\text{факт}} > F_{\text{табл}}$ (4.03). Коэффициент регрессии (b) и свободный член уравнения значимы (t -критерий больше 2.009). Для значения критерия Дарбина–Уотсона (DW) выполняется условие ($1.50 < 1.75$ и $1.59 < 1.75 < 4 - 1.59$), следовательно автокорреляция остатков отсутствует. Значение RS-критерия по-

Таблица 1. Показатели качества регрессионной модели ($n = 48$)

Показатель	Значение
Коэффициент корреляции, r	0.92
Коэффициент детерминации, r^2	0.85
F -критерий	319.3 ($p < 10^{-6}$)
t -критерий для коэффициента регрессии (b)	17.87 ($p < 10^{-6}$)
t -критерий для свободного члена уравнения	-11.0 ($p < 10^{-6}$)
DW	1.75
RS	4.9
MAPE, %	3.4

Примечание. DW – критерий Дарбина–Уотсона (тест на наличие автокорреляции остатков), RS-критерий – тест на нормальность распределения остатков, MAPE – средняя абсолютная относительная ошибка, n – число наблюдений, p – вероятность ошибки.

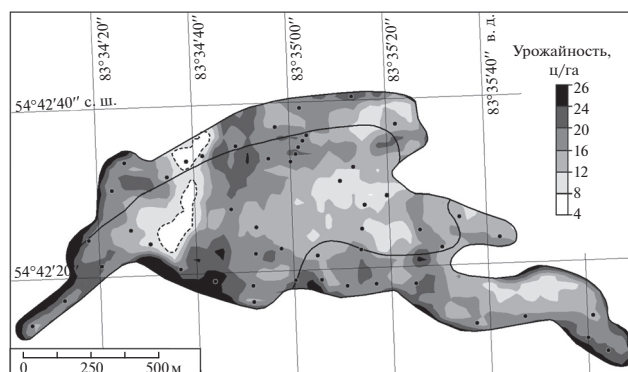


Рис. 4. Урожайность яровой пшеницы Новосибирская-15. Типы почв показаны сплошной линией, названия почв см. рис. 2. Пунктирной линией показаны ареалы распространения личинок майского жука (*Melolontha*) в почве.

падает в критический интервал (3.83–5.35), поэтому остатки имеют нормальное распределение. Значение MAPE менее 10%, что соответствует высокой точности прогноза. Таким образом, на основании практически всех статистических показателей качества, рассматриваемая модель достаточно хорошо согласуется с фактически измеренными данными.

Визуальное сравнение карты урожайности пшеницы на разных типах почв не выявило особых различий, что подтверждается данными табл. 2. В западной части поля урожайность яровой пшеницы была низкой – от 4 до 8 ц/га (рис. 4). На этом участке в поверхностном слое почвы обнаружены личинки майского жука (*Melolontha*) в количестве – 32 шт./м², которые значительно повредили корневую систему пшеницы, что привело к гибели растений и образованию ареалов с низкой урожайностью.

Согласно лабораторно-аналитическим исследованиям, содержание гумуса и предпосевная влажность в пахотном горизонте агрочернозема были наибольшими и составили в среднем 4.7 и 23.4% соответственно. Статистически подтверждено, что в этой почве наблюдалось большее содержание нитратного азота, подвижного и легкоподвижного фосфора, обменного калия, подвижного цинка, которое составило в среднем 5.9, 262, 4.4, 186 и 1.1 мг/кг соответственно. Реакция среды обеих почв слабокислая: среднее значение pH водной суспензии в агрочерноземе 6.2, в агротемно-серой почве – 5.9. По содержанию физической глины, обменного кальция и магния, подвижных форм меди, марганца и кобальта в почвах, относящихся к различным отделам классификации, статистически значимых отличий средних значений не обнаружено.

В агротемно-серой почве по сравнению с агрочерноземом содержание гумуса в пахотном гори-

Таблица 2. Варьирование показателей пахотного горизонта почв, NDVI и урожайности яровой пшеницы

Показатель	Почва	
	агрочернозем ($n = 24$)	агротемно-серая ($n = 24$)
Влажность, %	$\frac{23.4 (23.4; 23.8)}{20.7-29.6}$	$\frac{21.9 \pm 1.8^*}{16.9-24.8}$
Гумус, %	$\frac{4.7 (4.4; 4.3)}{3.3-7.8}$	$\frac{4.1 \pm 0.95^{**}}{2.5-5.9}$
Азот нитратный, мг N-NO ₃ /кг	$\frac{5.9 \pm 1.8}{3.3-10.9}$	$\frac{4.1 \pm 1.0^*}{2.4-6.4}$
Фосфор подвижный, мг P ₂ O ₅ /кг	$\frac{262 (193; 282)}{111-1176}$	$\frac{164 \pm 40^{**}}{91-237}$
Фосфор легкоподвижный, мг P ₂ O ₅ /кг	$\frac{4.39 (1.95; 2.22)}{0.26-37.33}$	$\frac{0.86 (0.75; 0.69)^{**}}{0.1-2.83}$
Калий обменный, мг K ₂ O/кг	$\frac{186 (146; 98)}{74-680}$	$\frac{137 (125; 110)^{**}}{62-506}$
Кальций обменный, смоль (экв)/кг	$\frac{16.2 (15.7; 16.6)}{11.6-23.3}$	$\frac{14.9 \pm 3.5}{9.9-21.1}$
Магний обменный, смоль (экв)/кг	$\frac{2.4 (2.3; 1.9)}{1.5-5.1}$	$\frac{2.1 (1.97; 1.97)}{1.0-2.8}$
Цинк подвижный, мг/кг	$\frac{1.1 (0.9; 0.8)}{0.5-2.9}$	$\frac{0.76 (0.64; 0.7)^*}{0.34-2.05}$
Медь подвижный, мг/кг	$\frac{0.077 \pm 0.022}{0.034-0.120}$	$\frac{0.074 \pm 0.028}{0.037-0.140}$
Марганец подвижный, мг/кг	$\frac{25.04 \pm 4.14}{16.6-32.7}$	$\frac{22.68 \pm 3.97}{13.3-29.9}$
Кобальт подвижный, мг/кг	$\frac{0.019 (0.024; 0)}{0-0.054}$	$\frac{0.020 (0.025; 0)}{0-0.048}$
Физическая глина, %	$\frac{39.1 (38.6; 36.8)}{30.8-51.4}$	$\frac{40.3 \pm 3.7}{34.8-50.1}$
pH водной суспензии	$\frac{6.2 \pm 0.3}{5.8-6.8}$	$\frac{5.9 \pm 0.3^*}{5.3-6.5}$
NDVI	$\frac{0.642 \pm 0.06}{0.536-0.766}$	$\frac{0.644 \pm 0.04}{0.541-0.716}$
Урожайность, ц/га	$\frac{16.9 \pm 4.1}{9.2-25.9}$	$\frac{17.2 \pm 3.2}{9.5-22.3}$

* Показатели статистически значимо ($p < 0.01$) отличающиеся от соответствующих величин в агрочерноземе.

** Отличия значимы при $p < 0.05$. Примечание. Над чертой: для нормально распределенных данных – среднее значение \pm стандартное отклонение; для ненормально распределенных данных – среднее значение и в скобках медиана и мода через точку с запятой; под чертой – диапазон значений (min–max); p – вероятность ошибки.

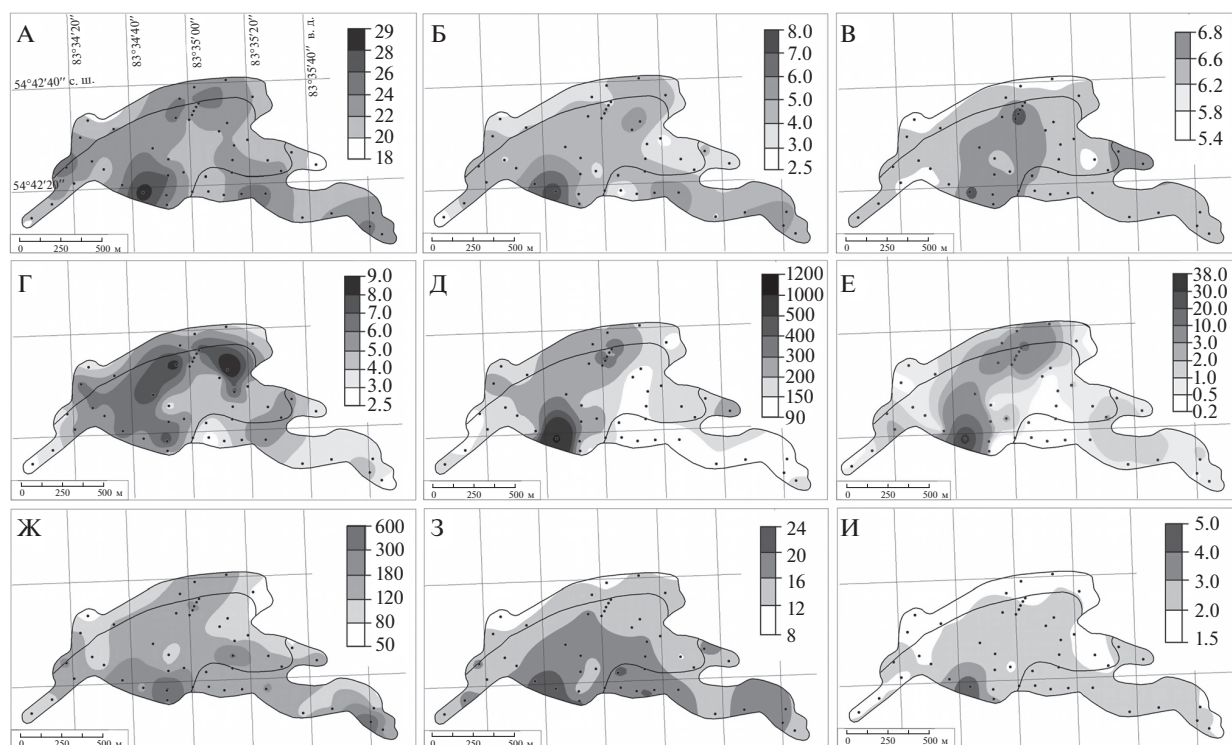


Рис. 5. Карты содержания в пахотном горизонте почв: А – предпосевной влажности, %; Б – гумуса, %; В – рН; Г – нитратного азота, мг N-NO₃/кг; Д – подвижного фосфора, мг P₂O₅/кг; Е – легкоподвижного фосфора, мг P₂O₅/кг; Ж – обменного калия, мг K₂O/кг; З – обменного кальция, смоль (экв)/кг; И – обменного магния, смоль (экв)/кг.

зонте было меньше в 1.2 раза, предпосевной влажности – в 1.1, нитратного азота – в 1.4, подвижного фосфора – в 1.6, легкоподвижного фосфора – в 5.1, обменного калия – в 1.4, подвижного цинка – в 1.5 раза, что свидетельствует о более высоком потенциальном плодородии агрочернозема. Несмотря на это, значения NDVI посевов и урожайности яровой пшеницы на агрочерноземе статистически значимо не отличались от соответствующих показателей агротемно-серой почвы.

Наибольшая урожайность яровой пшеницы (26 ц/га) наблюдалась на более увлажненном агрочерноземе средней части южного склона (рис. 4, 5, А), тогда как на менее увлажненных почвах водораздельной территории урожайность яровой пшеницы была меньше. В почве этой же средней части южного склона наблюдалось большее содержание гумуса, подвижного и легкоподвижного фосфора, обменных кальция и магния, подвижных форм цинка и меди (рис. 5, Б, Д, Е, З, И, рис. 6, А, Б), а также зафиксирована нейтральная реакция среды (рис. 5, В). Перечисленные свойства почв, за исключением содержания подвижных форм меди и фосфора, коррелировали с предпосевной влажностью (табл. 3). Таким образом, более увлажненные агрочерноземы в средней части южного склона отличались более высоким эффективным и потенциальным плодородием, в поддержании которого немаловажную роль играет влаж-

ность почв (усиливает выветривание минералов и растворимость веществ, улучшает доступность питательных элементов растениям). Необходимо отметить, что не для всех важных показателей плодородия (содержание нитратного азота и обменного калия) было зафиксировано максимальное значение в почвах средней части южного склона (рис. 5, Г, Ж). Однако их значения в пахотном горизонте почв были не самыми низкими в пределах поля, также установлена корреляция с предпосевной влажностью (табл. 3).

Из всех свойств пахотного горизонта, с которыми обнаружена заметная связь с урожайностью пшеницы, можно выделить предпосевную влажность и содержание обменного калия. Недостаточная влажность почвы в весенний период очень часто является основной причиной лимитирующей продуктивности сельскохозяйственных культур, даже при достаточном обеспечении основными макроэлементами. Дефицит влаги приводит к ухудшению всхожести семян и ускорению развития растений, которое характеризуется сокращением образования новых завязей и быстрым созреванием (формируется короткий колос и щуплое зерно), что в итоге приводит к снижению урожайности. Таким образом, низкая предпосевная влажность почв препятствует прочим свойствам произвести их эффект на урожайность пшеницы. Так, например, такое важное свойство

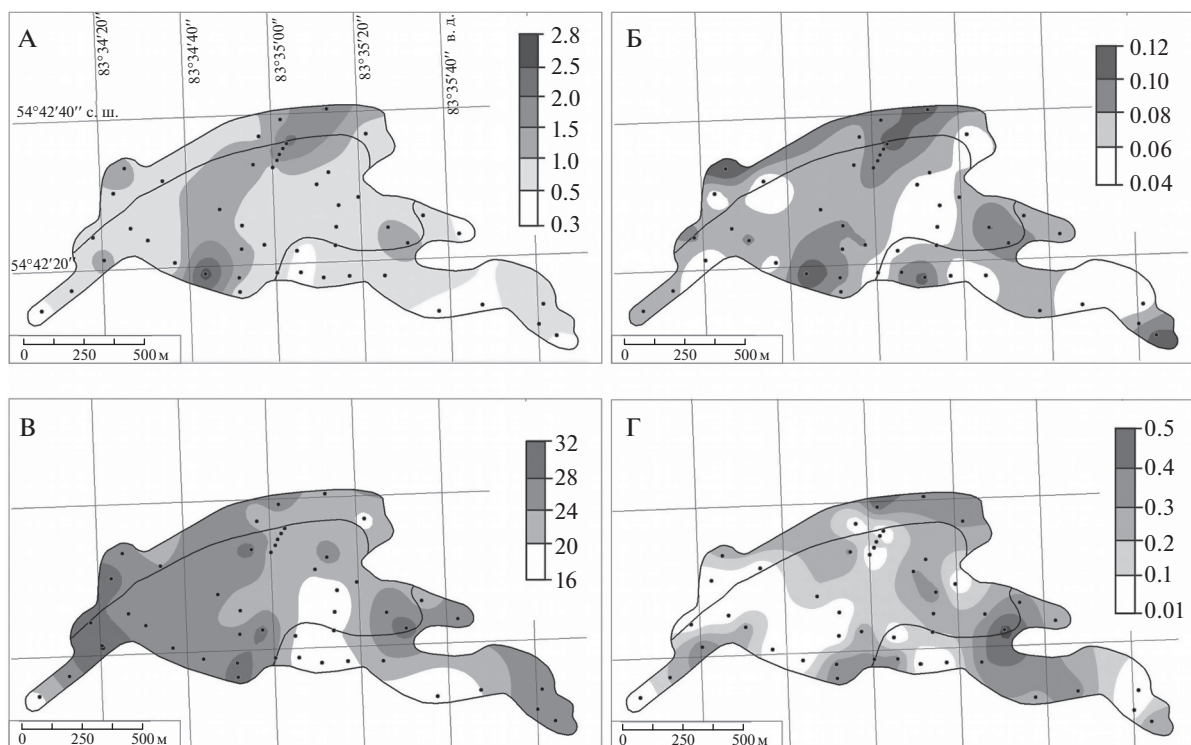


Рис. 6. Карты содержания в пахотном горизонте почв подвижных форм элементов (мг/кг): А – цинка; Б – меди; В – марганца; Г – кобальта.

почвы, как содержание нитратного азота, не имело корреляционной связи с показателем NDVI и урожайностью пшеницы, в чем можно убедиться, сравнив карты урожайности пшеницы и содержания нитратного азота (рис. 4, 5, Г).

Корреляционная связь показателя NDVI и урожайности пшеницы с содержанием обменного калия объясняется участием этого элемента в регулировании водного обмена в растениях. Если влажность почвы достаточная, то калий потребляется растениями в больших количествах. Наличие заметной корреляции между содержанием обменного калия и влажностью обусловлено большим высвобождением калия из необменных форм в обменные на более увлажненных почвах.

Корреляция показателя NDVI и урожайности яровой пшеницы с легкоподвижным фосфором объясняется активным участием этого элемента в росте и развитии растений. Отсутствие корреляции с подвижным фосфором можно объяснить тем, что экстрагент 0.5 М CH_3COOH извлекает часть малодоступных растениям фосфатов, поэтому значения по содержанию подвижного фосфора, возможно, не объективны в плане оценки фосфорного питания растений.

Обнаружены умеренные корреляции показателя NDVI и урожайности пшеницы с содержанием гумуса и подвижным цинком. Согласно данным [12], у пшеницы при недостатке цинка на

листьях появляются серо-зеленые пятна, после чего листья отмирают, что приводит к уменьшению площади ассимилирующей поверхности листьев и снижению урожайности. Изученные почвы по содержанию подвижного цинка (рис. 6, А) в большей степени относятся к низкообеспеченным (менее 2 мг/кг) [21], за исключением незначительных по площади отдельных ареалов, где обеспеченность почв цинком была средней (2.1–5.0 мг/кг). Однако на тех небольших ареалах, где содержание подвижного цинка было больше, урожайность тоже была относительно больше, что свидетельствует о его важной роли в росте и развитии растений (рис. 4, рис. 6, А).

Согласно группировке почв по содержанию подвижных форм микроэлементов [21], на обследованном поле в пахотном горизонте почв установлено низкое содержание меди (менее 0.2 мг/кг), среднее и высокое – марганца (табл. 2, рис. 6, А–В). Обеспеченность почв подвижным кобальтом (рис. 6, Г) варьировала – от низкой (<0.15) и средней (0.16–0.30) до высокой (>0.3 мг/кг). Установленные слабые корреляции показателя NDVI и урожайности пшеницы с содержанием подвижных форм меди, марганца и кобальта не позволяют уверенно сказать, что такой уровень содержания этих элементов в почве оказывает существенное влияние на продуктивность сельскохозяйственных растений (табл. 3).

Таблица 3. Коэффициенты корреляции Спирмена (выделены серым цветом) и Пирсона (без выделения) между свойствами пахотного горизонта почв (0–30 см) и параметрами яровой пшеницы

Показатель (<i>n</i> = 48)	Физическая глина*	N- NO ₃ *	P ₂ O ₅ подв.*	P ₂ O ₅ легкоподв.*	K ₂ O обм.*	Mg ²⁺ обм.*	Ca ²⁺ обм.	Влаж- ность	Гу- мус	pH	Zn подв.*	Co подв.*	Cu подв.	Mn подв.	NDVI	Урожай- ность
Физ. глина*	—															
N–NO ₃ *	–0.34	—														
P ₂ O ₅ подв.*	–0.51	0.48	—													
P ₂ O ₅ легкоподв.*	–0.5	0.43	0.57	—												
K ₂ O обм.*	x	x	x	x	—											
Mg ²⁺ обм.*	0.52	x	x	x	0.37	—										
Ca ²⁺ обм.	0.62	x	x	x	0.39	0.85	—									
Влажность	x	0.60	x	0.36	0.56	0.38	0.50	—								
Гумус	x	0.36	x	x	0.33	0.61	0.66	0.77	—							
pH водный	x	0.30	0.32	x	0.41	0.48	0.45	0.39	0.34	—						
Zn подв.*	–0.66	0.50	0.59	0.63	x	x	–0.31	0.44	x	x	—					
Co подв.*	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	—				
Cu подв.	–0.31	x	0.40	0.34	x	x	–0.39	x	x	x	0.39	x	—			
Mn подв.	x	0.30	0.32	0.33	0.28	x	x	x	x	x	0.43	x	x	—		
NDVI	x	x	x	0.35	0.61	x	x	0.57	0.38	x	0.48	x	0.23	0.28	—	
Урожайность	x	x	x	0.32	0.58	x	x	0.52	0.35	x	0.42	x	0.22	0.26	0.92	—

* Показатели, имеющие ненормальное статистическое распределение. Примечание. *p* – вероятность ошибки; *n* – количество почвенных проб; x – корреляция между величинами слабая и не достигает уровня статистической значимости. Жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции, характеризующие заметную и высокую силу связи. Коэффициенты корреляции (*r* и *r_s*) со значениями >0.35 представлены с *p* < 0.01; *r* и *r_s* < 0.35; *p* < 0.05.

ВЫВОДЫ

1. На основе статистической зависимости между урожайностью и показателем NDVI получена регрессионная модель, которая позволила составить карту пространственной изменчивости урожайности яровой пшеницы. Показатель NDVI объяснил 85% вариации урожайности яровой пшеницы. Выявлено, что значения NDVI посевов и урожайность пшеницы на агротемно-серой почве статистически значимо не отличались от соответствующих показателей на агрочерноземе, который характеризовался более высоким плодородием.

2. Установлена заметная положительная корреляционная связь урожайности яровой пшеницы и NDVI с предпосевной влажностью ($r = 0.52$; $r_s = 0.57$) и содержанием обменного калия ($r_s = 0.58$; $r_s = 0.61$), умеренная связь с гумусом ($r = 0.35$; $r_s = 0.38$), легкоподвижным фосфором ($r_s = 0.32$; $r_s = 0.35$) и подвижным цинком ($r_s = 0.42$; $r_s = 0.48$). Выявлено сравнительно высокое содержание подвижных форм макро- и микроэлементов в почвах с более высокими значениями предпосевной влажности. Не обнаружены значимые корреляции показателя NDVI и урожайности яровой пшеницы с содержанием нитратного азота, подвижного фосфора, физической глины, обменного кальция и магния, подвижных форм меди, марганца и кобальта, показателем рН.

3. Статистически подтверждено, что показатели предпосевной влажности, рН водной суспензии и содержание в пахотном горизонте гумуса, нитратного азота, подвижного и легкоподвижного фосфора, обменного калия, подвижного цинка больше в агрочерноземе по сравнению с агротемно-серой почвой. Не обнаружено статистически значимых различий по содержанию физической глины, обменного кальция и магния, подвижных форм меди, марганца и кобальта в почвах, относящихся к разным отделам классификации.

4. Установлено, что низкое содержание макро- и микроэлементов, недостаточная предпосевная влагообеспеченность почвы, а также вредители культур являлись причинами неравномерной урожайности яровой пшеницы. Недостаточная предпосевная влажность почв являлась лимитирующим фактором в формировании урожая и не позволила другим свойствам произвести эффект в его увеличении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
2. Антонов В.Н., Сладких Л.А. Мониторинг состояния посевов и прогнозирование урожайности яровой пшеницы по данным ДЗЗ // Геоматика. 2009. № 4(5). С. 50–53.
3. Бондаренко Н.Ф., Жуковский Е.Е., Мутнин И.Г., Полуэктов Р.А., Усков И.В. Моделирование про-

- дуктивности агроэкосистем. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 264 с.
4. Дейвис Ш.М., Ландгребе Д.А., Филлипс Т.Л. и др. / Под ред. Ф. Свейна и Ш. Дейвис. Дистанционное зондирование: количественный подход. М.: Недра, 1983. 415 с.
5. Важенин И.Г., Музычкин Е.Т., Прохорова З.А., Аleshina Т.Н. О методике составления крупномасштабных почвенно-агрохимических картограмм в целях применения удобрений // Почвоведение. 1961. № 4. С. 1–13.
6. Гонн Н.В. Алгоритмический подход при составлении цифровых почвенных карт на основе лабораторно-полевых и спутниковых данных // Исследование Земли из космоса. 2013. № 3. С. 58–72.
7. Гонн Н.В. Моделирование запасов надземной фитомассы тундровых сообществ растений с использованием наземных и спутниковых данных // Горный информационно-аналитический бюл. 2009. Т. 17. № 12. С. 200–205.
8. Гонн Н.В. Почвы юго-западной части Джунгальской котловины, Республика Алтай // Почвоведение. 2015. № 6. С. 656–667.
9. Гонн Н.В., Нечаева Т.В., Савенков О.А., Смирнова Н.В., Смирнов В.В. Оценка влияния мезорельефа склона на пространственную изменчивость свойств почвы и характеристики растительного покрова по данным дистанционного зондирования Земли // Исследование Земли из космоса. 2016. № 3. С. 1–10.
10. Гонн Н.В., Нечаева Т.В., Савенков О.А., Смирнова Н.В., Смирнов В.В. Применение цифровой модели высот (ASTER GDEM, 30 м) для оценки пространственной изменчивости содержания основных макроэлементов в агросерой почве склона // Агрохимия. 2016. № 4. С. 46–54.
11. Гонн Н.В., Савенков О.А., Нечаева Т.В., Смирнов В.В. Влияние морфометрических характеристик рельефа на пространственную изменчивость содержания обменного калия в агросерой типичной почве // Агрохимия. 2014. № 5. С. 54–63.
12. Дробков А.А. Микроэлементы и естественные радиоактивные элементы в жизни растений и животных. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1958. 208 с.
13. Звонкова Т.В. Прикладная геоморфология. М.: Высшая школа, 1970. 272 с.
14. Кашкин В.Б., Сухинин А.И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. М.: Логос, 2001. 264 с.
15. Кашианов А.Н., Явтушенко В.Е. Агроэкология почв склонов. М.: Колос, 1997. 240 с.
16. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
17. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 223 с.
18. Кумаков В.А. Физиология яровой пшеницы. М.: Колос, 1980. 207 с.
19. Либих Ю. Химия в приложении к земледелию и физиологии. М.: ОГИЗ-СЕЛЬЗОЗГИЗ, 1936. 406 с.
20. Мелиховская П.В. Изучение пространственной изменчивости свойств почв геостатистическими методами. Автореф. дис. ... канд. биол. н. М.: 2011. 21 с.
21. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: ФГНУ Росинформагротех, 2003. 240 с.

22. Орлов А.Д. Эрозия и эрозионноопасные земли Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1983. 208 с.
23. Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
24. Почвенная карта совхоза "Елбашинский" Искитимского района Новосибирской области. М 1 : 25000. Новосибирск: ЗАПСИБГИПРОЗЕМ, 1984.
25. Прохорова З.А., Савинова Е.Н. Зависимость урожайности зерновых культур от содержания подвижных элементов питания в почве // Закономерности пространственного варьирования свойств почв и информационно-статистические методы их изучения. М.: Наука, 1970. С. 95–102.
26. Рачкулик В.И., Ситникова М.В. Отражательные свойства и состояние растительного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 287 с.
27. Рис У. Основы дистанционного зондирования Земли. М.: Техносфера, 2006. 336 с.
28. Савин И.Ю., Танов Э.Р., Харзинов С. Использование вегетационного индекса NDVI для оценки качества почв пашни (на примере Баксанского района Кабардино-Балкарии) // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2015. Вып. 77. С. 51–65.
29. Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л., Дмитриев Е.А. Структуры пространственной вариабельности агрохимических свойств пахотной дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 1999. № 11. С. 1359–1366.
30. Семенов В.А. Взаимозависимость между содержанием гумуса и другими свойствами почвы – факторами урожая // Почвоведение. 1992. № 11. С. 68–80.
31. Трифонова Т.А., Мищенко Н.В. Почвенно-продукционный потенциал экосистем речных бассейнов на основе наземных и дистанционных данных. М.: ГЕОС, 2013. 271 с.
32. Чандра А.М., Гош С.К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. М.: Техносфера, 2008. 312 с.
33. Якутина О.П., Нечаева Т.В., Смирнова Н.В. Режимы основных элементов питания и продуктивность растений на эродированных почвах юга Западной Сибири // Проблемы агрохимии и экологии. 2011. № 1. С. 16–22.
34. Benedetti R., Rossini P. On the use of NDVI profiles as a tool for agricultural statistics: the case study of wheat yield estimate and forecast in Emilia Romagna // Remote Sensing of Environment. 1993. V. 45. P. 311–326.
35. Gopp N.V. Soils of the Southwestern Part of the Dzhulukul Depression in the Altai Republic // Eurasian Soil Science. 2015. V. 48. № 6. P. 567–577.
36. Huete A.R., Liu H.Q. An Error and Sensitivity Analysis of the Atmospheric- and Soil-Correcting Variants of the NDVI for the MODIS-EOS // IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1994. № 32. P. 897–905.
37. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports № 106. FAO, Rome, 2014. 181 p.
38. Heikki L., Mika K., Jouko K., Juha H. Cereal Yield Modeling in Finland Using Optical and Radar Remote Sensing // Remote Sensing. 2010. № 2. P. 2185–2239.
39. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351. 1973. P. 309–317.
40. Sellers P.J. Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration // International J. Remote Sensing. 1985. № 6. P. 1335–1372.
41. Tucker C.J., Vanpraet C.L., Sharman M.J., Van Ittersum G. Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the senegalese sahel: 1980–1984 // Remote Sensing of Environment. 1985. № 17. P. 233–249.
42. Yakutina O.P., Nechaeva T.V., Smirnova N.V. Consequences of snowmelt erosion: Soil fertility, productivity and quality of wheat on Greyzemic Phaeozem in the south of West Siberia // Agriculture, Ecosystem and Environment. 2015. V. 200. P. 88–93.

The Relationship between NDVI and Spring Wheat Yield and the Properties of Arable Horizon of Eluviated Clay-Illuvial Chernozems and Dark Gray Soils

N. V. Gopp^{a,*} and O. A. Savenkov^a

^a*Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, prosp. Akad. Lavrent'eva 8/2, Novosibirsk, 630090, Russia*

^{*}*e-mail: natalia.gopp@gmail.com*

On the Cis-Salair Plain with well-drained soils, the statistical dependence of spring wheat yields and NDVI on some properties of arable horizon in eluviated clay-illuvial agro-chernozems (Luvic Greyzemic Chernozems) and agro-dark-gray soils (Luvic Retic Greyzemic Phaeozems) was studied. In regression model NDVI was shown to be responsible for 85% of the variation in the yield of spring wheat. Using the model and the basis of the spatial distribution of NDVI, the prediction and visualization of the spatial variability of the spring wheat yield was performed. The spring wheat productivity and NDVI proved to be not significantly different statistically for the agro-dark-gray soil and for agro-chernozems. The correlation was significant between the yield of spring wheat and NDVI on one hand, and presowing moisture ($r = 0.52$; $r_s = 0.57$) and the content of exchangeable potassium ($r_s = 0.58$; $r_s = 0.61$) on the other hand, while for humus ($r = 0.35$; $r = 0.38$), easily available phosphorus ($r_s = 0.32$; $r_s = 0.35$) and mobile zinc ($r_s = 0.42$; $r_s = 0.48$) the correlation was moderate. A relatively high content of mobile forms of macro- and microelements in soils with higher values of presowing moisture was established.

Keywords: Chernozems, Phaeozems, Landsat 8, macro- and microelements, humus, presowing moisture, nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, zinc, copper, manganese, cobalt