

УДК 633.11:551.5

DOI: 10.5281/zenodo.7898389

EDN RCYGEQ

Гулянов Ю. А., Поляков Д. Г.

ЗАВИСИМОСТЬ ФИТОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЕВЫХ АГРОЦЕНОЗОВ ОТ АГРОФИЗИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЧВЫ

Институт степи Уральского отделения Российской академии наук (ИС УрО РАН) – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Оренбургский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (ОФИЦ РАН)

Реферат. Экспресс-оценка уровня развития фитомассы полевых агроценозов и агрофизических показателей почвы необходимы для оперативной технологической оптимизации условий произрастания полевых культур, более полной реализации их урожайного потенциала, а также сохранения и воспроизводства почвенного плодородия. Исследования проводили в 2020–2022 гг. в производственных посевах учебно-опытного поля Оренбургского государственного аграрного университета. Объектом исследований выступали нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI) агроценозов озимой и яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.), овса посевного (*Avena sativa* L.), возделываемых по минимальной технологии, и агрофизические параметры (твёрдость, влажность, плотность) почвы экспериментального участка. Определение NDVI проводили по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и ручным сенсором *Green Seeker Handheld Crop Sensor, Model HCS - 100*. Для определения твёрдости почвы использовали пенетрологгер *Eijkelkamp 06.15.SA*, плотность пахотного слоя почвы определяли буровым методом по Н. А. Качинскому, влажность почвы – термостатно-весовым методом. При обработке цифрового материала применяли общепринятые методы статистического анализа. Установлена приемлемость современных инструментальных методов определения фитометрических параметров посевов и агрофизических свойств почвы с помощью портативных устройств, их простота и оперативность. Подтверждена высокая сходимость результатов определения NDVI по спутниковым снимкам и полученным в процессе наземного сканирования. Выявлена зависимость фитометрических параметров агроценоза овса (по NDVI) от агрофизических параметров почвы. Отмечена наиболее выраженная обратная связь ($r = -0,52$) NDVI с плотностью верхнего (5–10 см) почвенного горизонта и твёрдостью слоёв почвы 5–10 см ($r = -0,43$) и 25–30 см ($r = -0,52$), наиболее вероятно связанная с переходом на прямой посев в современных агротехнологиях и наследием глубоких обработок в ретроспективе, способствовавших уплотнению почвы в этих горизонтах.

Ключевые слова: ДЗЗ, фитометрические параметры посева, агрофизические свойства почвы, твёрдость почвы, овёс посевной (*Avena sativa* L.).

Для цитирования: Гулянов Ю. А., Поляков Д. Г. Зависимость фитометрических параметров полевых агроценозов от агрофизических показателей почвы // Таврический вестник аграрной науки. 2023. № 1(33). С. 19–33. DOI: 10.5281/zenodo.7898389. EDN: RCYGEQ.

For citation: Gulyanov Yu. A., Polyakov D. G. Dependence of phytometric parameters of agrocenoses on agrophysical indicators of soil // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2023. No. 1(33). P. 19–33. DOI: 10.5281/zenodo.7898389. EDN: RCYGEQ.

Введение

Обеспечение продовольственной безопасности населения и экспортного потенциала страны являются одними из приоритетных задач сельскохозяйственной отрасли РФ. Их успешная реализация напрямую зависит от размеров и стабильности валовых сборов зерновых культур, в большей степени определяемых их урожайностью.

Реализация генетического потенциала выращиваемых сортов в свою очередь зависит от условий внешней среды, включающих метеорологические, почвенные, воздушные и прочие факторы, характеризующиеся значительной пространственной и временной изменчивостью, даже в пределах небольших площадей. Их динамика сопровождается значительной гетерогенностью фитомассы, что впоследствии приводит к изменению урожайности и уменьшению валовых урожаев.

Нивелирование условий внешней среды путём приближения лимитирующих факторов, специфичных для отдельных элементарных участков поля, к оптимальным значениям путём дифференцированного воздействия теми или иными средствами, отрабатывается в системах точного земледелия в мировой и отечественной сельскохозяйственной практике достаточно давно, хотя не везде одинаково широко и успешно [1, 2]. Такой подход предполагает активное внедрение элементов интеллектуальных технологий, предполагающих использование информационных ресурсов дистанционного зондирования земли (ДЗЗ), данных наземного сканирования посевов и использования роботизированной техники для максимальной реализации биологического потенциала всех растений в агроценозе посредством более полного удовлетворения их потребностей [3, 4].

По убеждению многих исследователей [5, 6], объективным критерием оценки продуктивных перспектив посевов служит уровень пространственного развития фитомассы и степень его соответствия оптимальным параметрам на каждом этапе вегетации. С его величиной достоверно коррелирует нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI), определение которого не представляет больших трудностей благодаря доступности методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и наземных методов исследования [7]. Частичное приведение заниженных параметров фитомассы на отдельных элементарных участках поля к оптимальным значениям может быть достигнуто уже в процессе вегетации, например, посредством дифференцированных минеральных подкормок в случае низкой обеспеченности почвы микроэлементами, обработок пестицидами при очаговой засорённости или поражённости болезнями и вредителями и др. [8].

В то же время формирование оптимальной фитомассы полевых культур значительно зависит от агрофизических свойств почвы, формирующих её водный, воздушный, тепловой и питательный режимы. Их приведение к оптимальным значениям требует определённых подготовительных мероприятий агротехнического характера: разработки адаптивных севооборотов, использования почвосберегающих машин, внедрения щадящих приёмов обработки почвы и др.

Для оперативной оценки агрофизического состояния почв агроландшафтов можно использовать разные параметры, характеризующие её свойства. К примеру, твёрдость почвы или сопротивление пенетрации представляет собой совокупную характеристику плотности почвы, её влажности, содержания в ней глинистой фракции, органического вещества [9] и непосредственно влияет на развитие корневых систем растений [10]. Принято считать, что при увеличении твердости почвы до 3 МПа значительно усиливается отрицательное воздействие на рост и развитие сельскохозяйственных растений [11]. Отмечается, что высокая твёрдость почвы является основным сдерживающим фактором роста корней даже во влажных

почвах [12]. Зависимость пространственного проникновения корней от сопротивления почвы зачастую оказывается близкой к линейной, но при этом индивидуальной для различных по своим структурно-агрегатным показателям почв [13].

Важной характеристикой агрофизических свойств почвы является и плотность почвы. Она зависит от гранулометрического и минералогического состава почвы, её структуры, содержания органического вещества (гумуса) и сельскохозяйственной практики, связанной с обработкой. Плотность сложения определяет водный и воздушный режим почвы (водопоглотительную и водоудерживающую способность, газообмен с атмосферой), условия жизнедеятельности микроорганизмов и развития корневых систем растений [14].

Для большинства сельскохозяйственных культур оптимальной считают плотность почвы 1,0–1,2 г/см³. Чрезмерное снижение плотности отрицательно сказывается на содержании влаги, элементов минерального питания в единице объёма почвы и полноте всходов. Напротив, повышение плотности сверх оптимальных значений сдерживает рост корней, ограничивает доступность влаги и обеспеченность воздухом. Визуально различимое угнетение растений наблюдается уже при уплотнении почвы до 1,30–1,35 г/см³ [15].

Значение оптимальной влажности почвы для высокой реализации урожайного потенциала полевых культур переоценить очень сложно, особенно в богарном земледелии [16, 17].

В соответствии с вышеизложенным, контроль агрофизических параметров почвы инструментальными методами, оценка их влияния на уровень развития фитомассы (посредством NDVI) и её соответствие оптимальным значениям являются актуальными научными направлениями.

Использование экспериментальных данных с целью усовершенствования и адаптации агротехнических приёмов, повышающих фотосинтетическую продуктивность агроценозов путём оптимизации агрофизических свойств почвы, может стать одним из путей увеличения продуктивности посевов, вывода из обработки низкоплодородных, неустойчивых и прочих маргинальных земель, служащих сохранению биологического разнообразия в зернопроизводящих регионах степной зоны России. В этом состоит практическая значимость проведённого эксперимента.

Цель исследований – выявление взаимосвязи фитометрических параметров полевых агроценозов и агрофизических показателей чернозёма южного с использованием инструментальных методов в условиях сухих степей Оренбургского Предуралья.

Для выполнения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- установить фитометрические параметры посевов с помощью нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI), данных ДЗЗ и портативного устройства наземного сканирования;
- определить твёрдость, плотность и влажность почвы на выделенных закреплённых участках поля инструментальными методами;
- провести корреляционный анализ полученных результатов, выявить наиболее выраженные зависимости между фитометрическими (по NDVI) параметрами посева и агрофизическими свойствами почвы;
- обосновать практическую значимость полученных результатов и перспективу продолжения научных исследований.

Материалы и методы исследований

Исследования проводили в 2020–2022 гг. в производственных посевах учебно-опытного поля Института степи Уральского отделения Российской академии наук (ИС УрО РАН) – обособленного структурного подразделения ФГБУН «Оренбургский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (ОФИЦ РАН) с озимой и яровой пшеницей (*Triticum aestivum* L.), овсом посевным (*Avena sativa* L.), возделываемыми по общепринятой для зоны исследований технологии, предполагающей минимальную обработку почвы.

Почва опытного участка – чернозём южный маломощный карбонатный тяжелосуглинистый с содержанием гумуса в пахотном слое почвы 3,8 % (по методу Тюрина), подвижного азота (NO_3^-) – 1,35 г/100 г почвы (при определении ионометрическим методом), легкогидролизуемого азота – 8,4 мг (по методу Тюрина и Кононовой), подвижного фосфора (P_2O_5) – 3,25 мг и обменного калия (K_2O) – 27,0 мг/100 г почвы (по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО).

Зона исследований характеризуется недостаточным и неустойчивым атмосферным увлажнением, продолжительной, морозной и не всегда снежной зимой, короткой дружной весной с быстрым переходом в жаркое засушливое лето и продолжительной тёплой и сухой осенью. Годовая сумма эффективных температур составляет 2627 °С, со средней температурой самого тёплого месяца (июль) 21,9 °С и самого холодного (январь) – 14,8 °С. За год выпадает 360–370 мм осадков, из которых около 130 мм (35,4 %) приходится на тёплый период (май–август) [3].

Объектом исследований выступали фитометрические параметры полевых агроценозов, оцениваемые по величине нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI, и агрофизические свойства (твёрдость, влажность, плотность) почвы, устанавливаемые инструментальными методами.

Для полевого эксперимента был выбран относительно горизонтальный участок, без ярко выраженных эрозионных проявлений и технологических отступлений, с визуально различимой неоднородностью растительного покрова, проявляющейся в разные по метеорологическим условиям годы в посевах различных культур зернопарового севооборота.

Нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI) посевов озимой пшеницы (2020 г.), яровой пшеницы (2021 г.) и овса (2022 г.) определяли на базе общедоступных космических снимков Landsat 8 и Sentinel-2, размещённых на on-line ресурсах Sentinel-hub.com.

На третий год полевого эксперимента (2022 г.) в пределах экспериментального участка агроценоза овса были заложены восемь пробных площадок по 100 м² (10×10) с разным уровнем развития фитомассы. В их границах определяли фитометрические параметры посева и агрофизические свойства почвы инструментальными методами. Определение NDVI и твёрдости почвы проводили в десятикратной повторности, влажности почвы – в трехкратной повторности.

Наземное измерение вегетационного индекса (NDVI) проводили портативным устройством (ручным сенсором) Green Seeker Handheld Crop Sensor, Model HCS - 100 (Trimble, USA).

Для определения твёрдости почвы послойно, через каждые 10 см (до глубины 80 см) использовался пенетрологгер Eijkelkamp 06.15.SA (Нидерланды), предоставленный Центром выявления и поддержки одаренных детей Оренбуржья «Гагарин» (г. Оренбург).

Плотность пахотного слоя почвы определяли буровым методом по Н. А. Качинскому в трёх слоях: 5–10 см, 15–20 см, 25–30 см. Оценку полученных

значений проводили также по методике Н. А. Качинского, в соответствии с которой почву с плотностью, не превышающей $1,0 \text{ г/см}^3$, считали рыхлой, богатой органическим веществом. Для вспаханной почвы характерной принимали плотность $1,0\text{--}1,1 \text{ г/см}^3$. При более высоких значениях почву считали уплотнённой ($1,2\text{--}1,3 \text{ г/см}^3$) и сильно уплотнённой ($1,3\text{--}1,4 \text{ г/см}^3$). К типичной для подпахотных горизонтов относили плотность $1,4\text{--}1,6 \text{ г/см}^3$ [18].

Влажность почвы определяли в этих же слоях термостатно-весовым методом [19].

При обработке цифрового материала применяли общепринятые методы корреляционного анализа [19].

Результаты и их обсуждение

В результате анализа рассчитанных на основе данных ДЗЗ величин NDVI озимой (2020 г.) и яровой (2021 г.) пшеницы, возделывавшихся на экспериментальном участке в зернопаровом севообороте, выявлена их значительная неоднородность. Показатели характеризовались схожим пространственным распределением в различные по метеорологическим условиям годы и близкой величиной.

Весенне-летние периоды вегетации 2020 и 2021 гг., в целом отличавшиеся высокой засушливостью, выразившейся в двукратном снижении ГТК Селянинова (до 0,27 и 0,22) относительно средних значений (0,54), имели некоторые особенности. При практически равном за два года суммарном количестве осадков периода май–август (71 и 67 мм соответственно), составившем только 54,6 % и 51,5 % от средних значений предшествующего тридцатилетнего периода (130 мм), их распределение по месяцам было различным. В мае, июне и августе осадков было больше в 2020 г. (суммарно 66 мм, что на 21 мм или 35,0 % больше, чем в 2021 г.), а в июле – в 2021 г. (26 мм, что на 18 мм или 69,2 % больше, чем в 2020 г.). Особенно скудным на атмосферные осадки в 2020 г. оказался июль (8 мм или 19,0 %), а в 2021 г. – август (2 мм или 8,3 %). Выявлены значительные различия и в термических ресурсах весенне-летних периодов. Если в 2020 г. сумма активных (выше $10 \text{ }^\circ\text{C}$) температур за май–август составила $2572 \text{ }^\circ\text{C}$, то в 2021 г. она оказалась на $385 \text{ }^\circ\text{C}$ (15,0 %) выше ($2957 \text{ }^\circ\text{C}$).

В таких различающихся метеорологических условиях пространственная неоднородность развития фитомассы озимой и яровой пшеницы оказалась схожей, что подтверждает визуализация NDVI в фазе колошения–цветения, представленной на рисунке 1.

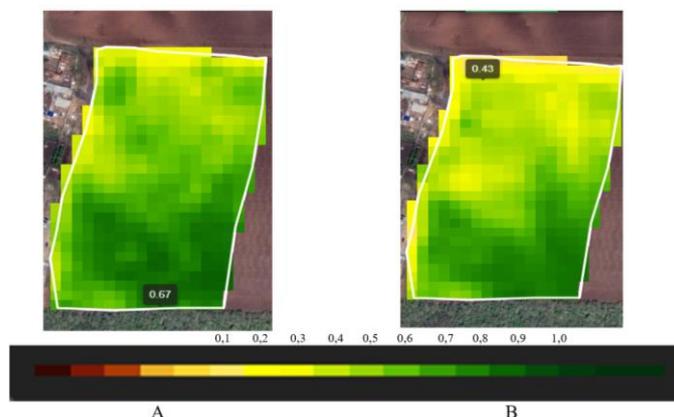


Рисунок 1 – Пространственная вариабельность нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI) агроценоза озимой (А) (2020 г.) и яровой (В) (2021 г.) пшеницы по данным ДЗЗ в фазе колошения–цветения

В результате корреляционного анализа пространственных рядов NDVI выявлена их совместная вариация с коэффициентом корреляции 0,84 (сильная связь), что послужило основанием для выявления других, не связанных с метеорологическими условиями, причин гетерогенности растительного покрова. Очаговой засорённости, заражённости болезнями или повреждения вредителями, которые могли бы вызвать искажение подлинных значений NDVI на отдельных элементарных участках, на экспериментальном поле не выявлено.

Следует отметить, что размах вариации NDVI по разным элементарным участкам агроценоза озимой пшеницы при средних значениях 0,53 составил 0,28 (от 0,39 до 0,67) с коэффициентом вариации 15,5 %. В агроценозе яровой пшеницы при среднем значении NDVI 0,57 его размах был на 0,02 ниже, снизился и на 2,7 % коэффициент вариации.

В 2022 г. с целью дальнейшего поиска причин, вносящих пестроту в пространственное распределение NDVI, вместе с интерпретацией космических снимков, проведено инструментальное определение NDVI и агрофизических показателей почвы.

В результате наземного сканирования посевов овса на выделенных закреплённых участках также выявлена значительная пространственная вариабельность нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI) – от минимальных 0,26 до максимальных 0,76 единиц. При размахе вариации в 0,50 единиц и коэффициенте вариации 33,1 % отмечено почти трёхкратное (в 2,9 раза) преимущество в степени развития фитомассы овса на одних участках в сравнении с другими, свидетельствующее о значительных различиях в их фотосинтетической активности и урожайных перспективах. Детальная интерпретация спутниковых снимков дала схожую картину вариации NDVI по исследуемым участкам, с коэффициентом корреляции (r) между результатами дистанционных и наземных измерений, свидетельствующем об их сильной связи ($r = 0,87$) (рисунок 2).

Как показывает практика, причинами гетерогенности растительного покрова полевых агроценозов может быть комплекс факторов, среди которых изреженность и пестрота всходов, их недружность и образование подгона в условиях недостаточной влагообеспеченности верхнего слоя почвы – достаточно частые явления в степной зоне. Наличие в агроценозе разновозрастных растений, не нивелирующееся со временем, приводит к формированию визуально определяемой мозаики из участков поля, значительно различающихся по продуктивности фитомассы.

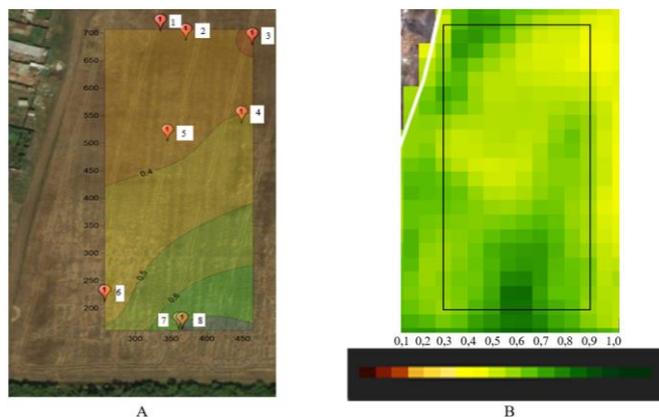


Рисунок 2 – Пространственная вариабельность нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI) агроценоза овса в фазе начала выхода в трубку по результатам наземного инструментального измерения (А) и данным ДЗЗ (В), 10 июня 2022 г.

Этому, вместе с недостаточностью атмосферного увлажнения, может способствовать и недобросовестная сельскохозяйственная практика, связанная с использованием устаревшей или низкокачественной сельскохозяйственной техники, непригодной к поддержанию установленной нормы высева семян, не способной выдерживать глубину посева. К подобным последствиям приводит и непрофессиональный подход к выбору приёмов подготовки почвы, особенно основанных на глубоких обработках с оборотом пласта. Значительно снижают дружность и полноту всходов использование низкокачественных семян, игнорирование их предпосевного протравливания, не соблюдение сроков посева и др.

При проведении полевого эксперимента (2020–2022 гг.) влияние подобных факторов было исключено, все агроприёмы проводили качественно и в срок.

Детальный анализ метеорологических параметров 2022 г. в предшествующий посеву (восьмого мая) и послепосевной периоды показал, что условия увлажнения были достаточно благоприятными для формирования дружных, полных и хорошо развитых всходов и не выступали в качестве лимитирующего фактора.

В этом состоит уникальность полевого эксперимента 2022 г., так как подобные условия увлажнения складываются в зоне исследований исключительно редко. За апрель выпало 23,5 мм или 84,0 % от среднемноголетней месячной нормы (28,0 мм). В мае отмечено 105,8 мм или более трёх среднемесячных климатических норм (34 мм). Особенно благоприятный режим увлажнения сложился в послепосевной период – период набухания семян, появления проростков и формирования всходов. Только с 10 по 25 мая выпало 104,5 мм осадков. Дожди выпадали практически ежедневно, не носили ливневого характера и хорошо впитывались почвой (рисунок 3)

До даты проведения инструментальных измерений (10 июня) прошли ещё несколько дождей – 14,4 мм пятого и 3,8 мм девятого июня.

В целом, темп накопления атмосферных осадков весной и в начале лета 2022 г. превышал среднемноголетний график практически на всём протяжении, а с 10 мая стал наиболее ощутимым, с максимальным превышением среднемноголетних величин на 85,1 мм (пятое июня).

Сложившийся режим выпадения атмосферных осадков обеспечил достаточно однородное увлажнение почвы на всём поле.

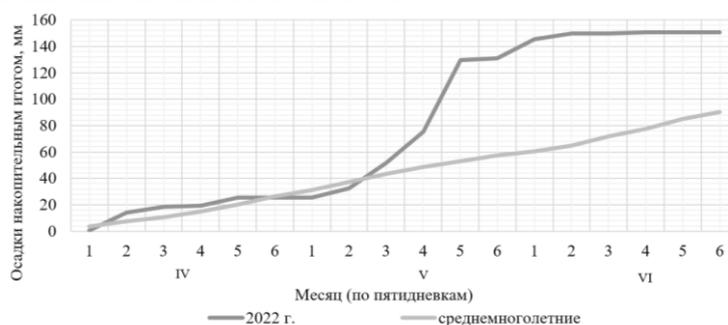


Рисунок 3 – Накопление атмосферных осадков в предпосевной и послепосевной периоды вегетации овса в 2022 г. на фоне среднемноголетних данных

Послойный анализ влажности почвы на отдельных экспериментальных участках выявил невысокую изменчивость ее показателей, составивших в верхнем (5–10 см) слое почвы 6,3 %, 5,8 % – в слое 15–20 см и 6,7 % – в слое 25–30 см. В среднем по восьми экспериментальным участкам поля влажность почвы изменялась от 24,1 % в слое 5–10 см до 24,6–25,1 % – в слоях 15–20 и 25–30 см соответственно, обеспечивая благоприятные условия влагообеспеченности растений (таблица 1).

Таблица 1 – Характеристика экспериментальных участков агроценоза овса по NDVI и агрофизическим свойствам почвы, июнь 2022 г.

№ участка	Глубина, см	Твёрдость почвы, МПа	Плотность почвы, г/см ³	Влажность почвы, %	NDVI, среднее значение
1	5–10	3,6	1,35	24,0	0,40
	15–20	3,4	1,33	24,2	
	25–30	2,7	1,17	24,8	
	5–30	3,2	1,29	24,3	
2	5–10	2,4	1,22	26,4	0,37
	15–20	2,9	1,26	25,3	
	25–30	2,4	1,22	24,8	
	5–30	2,6	1,23	25,5	
3	5–10	2,7	1,41	22,7	0,28
	15–20	2,7	1,3	23,0	
	25–30	2,6	1,15	24,6	
	5–30	2,6	1,29	23,4	
4	5–10	2,3	1,35	21,6	0,42
	15–20	2,9	1,35	22,3	
	25–30	2,6	1,26	22,9	
	5–30	2,7	1,32	22,2	
5	5–10	2,3	1,41	21,9	0,37
	15–20	2,8	1,31	23,2	
	25–30	2,6	1,27	21,0	
	5–30	2,6	1,33	22,0	
6	5–10	1,2	1,33	27,9	0,44
	15–20	1,9	1,33	28,1	
	25–30	2,2	1,27	27,7	
	5–30	2,0	1,31	27,9	
7	5–10	1,7	1,28	24,2	0,68
	15–20	2,4	1,34	26,1	
	25–30	2,5	1,23	27,2	
	5–30	2,4	1,28	25,8	
8	5–10	2,0	1,28	23,7	0,75
	15–20	2,9	1,25	24,7	
	25–30	2,2	1,16	27,8	
	5–30	2,4	1,23	25,4	

Определение плотности почвы по экспериментальным участкам агроценоза овса позволило установить, что ее значения часто превышают оптимальный диапазон (1,10–1,25 г/см³), характерный для южных чернозёмов [20]. Вероятнее всего, это можно отнести к некоторому переувлажнению обедненной органическим веществом почвы, не успевшей достичь оптимальной физической спелости благодаря часто выпадавшим дождям при невысокой солнечной активности, особенно в верхних горизонтах.

Средняя плотность верхнего (5–10 см) слоя почвы с размахом вариации 0,19 г/см³ (от 1,22 до 1,41 г/см³) составила 1,32 г/см³, что соответствует пограничному положению между уплотнённой и сильно уплотнённой почвой (по методике Н. А. Качинского). В слое 15–20 см плотность почвы оказалась на 0,02 г/см³ ниже (1,30 г/см³) и ещё на 0,09 г/см³ (1,21 г/см³) ниже в слое 25–30 см при изменчивости от 1,26 до 1,35 г/см³ и от 1,15 до 1,27 г/см³ соответственно.

Плотность корнеобитаемого слоя почвы (5–30 см) в среднем по восьми экспериментальным участкам составила 1,28 г/см³ и в целом характеризовала почву как уплотнённую. Её пространственная изменчивость оказалась невысокой (0,1 г/см³), от 1,23 до 1,33 г/см³, с коэффициентом вариации 2,9 % (рисунок 4).

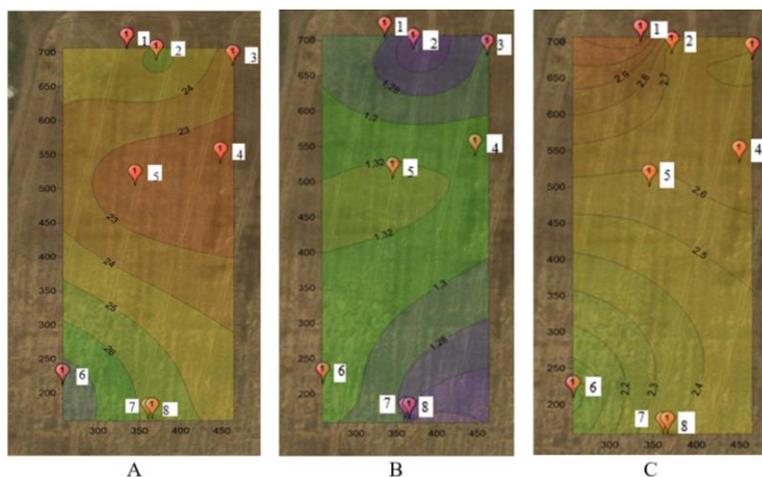


Рисунок 4 – Пространственное распределение агрофизических свойств почвы в слое 5–30 см в агроценозе овса по результатам инструментальной оценки, учебно-опытное поле Оренбургского ГАУ, июнь 2022 г.: А – влажность почвы, %; В – плотность почвы, г/см³, С – твёрдость почвы, МПа

Наименьшие значения твёрдости почвы на исследуемых экспериментальных участках отмечены на поверхности почвы – около 0,5 МПа (рисунок 5). В горизонте почвы 0–10 см наблюдали стремительный рост показателей, на отдельных экспериментальных участках – до критических значений в 3–4 МПа, что является свидетельством средней агрофизической деградации почвы [11]. На глубине 10–30 см происходило некоторое снижение твёрдости почвы и последующее небольшое увеличение на глубине 30–35 см.

Наличие пика твёрдости почвы на глубине 10 см отчётливо просматривалось на пяти из восьми профилей и, вероятно, было связано с переходом на нулевые и минимальные обработки почвы в их существенно упрощённом понимании (посев–уборка). В частности, это может быть связано с длительным прямым посевом сеялками, оборудованными высевающими аппаратами в виде стрельчатых лап (типа АУП-18.05 и её модификаций), формирующих чрезмерно уплотнённое семенное ложе, особенно на почвах, обеднённых органическим веществом.

Небольшой и не везде отчётливый пик увеличения твёрдости почвы на глубине 30–35 см, просматривающийся на отдельных профилях, наиболее вероятно связан с ещё сохраняющейся плужной подошвой или её последствиями, как наследием длительной глубокой обработки почвы с оборотом пласта, проводимой бесценно ранее.

Корреляционный анализ числовых рядов агрофизических параметров почвы и фитометрических параметров (по NDVI) агроценоза овса на соответствующих экспериментальных участках поля позволил выявить наиболее выраженные зависимости, характеризующиеся определёнными особенностями.

Так, наибольшее выраженная связь NDVI агроценоза овса и плотности почвы отмечена в самом верхнем её слое (5–10 см), где практически во всех вариантах наблюдали уплотнение почвы сверх оптимального. Связь указанных параметров обратная средняя ($r = -0,52$). Связь NDVI и плотности более глубоких горизонтов почвы оказалась менее выраженной, с коэффициентом корреляции $-0,18$ и $-0,11$ (15–20 см и 25–30 см соответственно), указывающим на слабую связь.

В отношении зависимости NDVI агроценоза овса от влажности отдельных горизонтов почвы выявлена прямая связь, значительно возрастающая к более глубоким горизонтам. Если с влажностью верхнего (5–10 см) горизонта (достаточно увлажнённого благодаря сложившимся метеорологическим особенностям года)

связь NDVI слабая ($r = 0,07$), с влажностью среднего (15–20 см) – средняя ($r = 0,35$), то с влажностью горизонта 25–30 см – близкая к сильной ($r = 0,65$). Это указывает на важность поддержания оптимальной влажности глубоких слоёв почвы, не подвергавшихся разрыхлению при минимальных обработках или прямом посеве, для формирования высокопродуктивных агроценозов полевых культур (таблица 2).

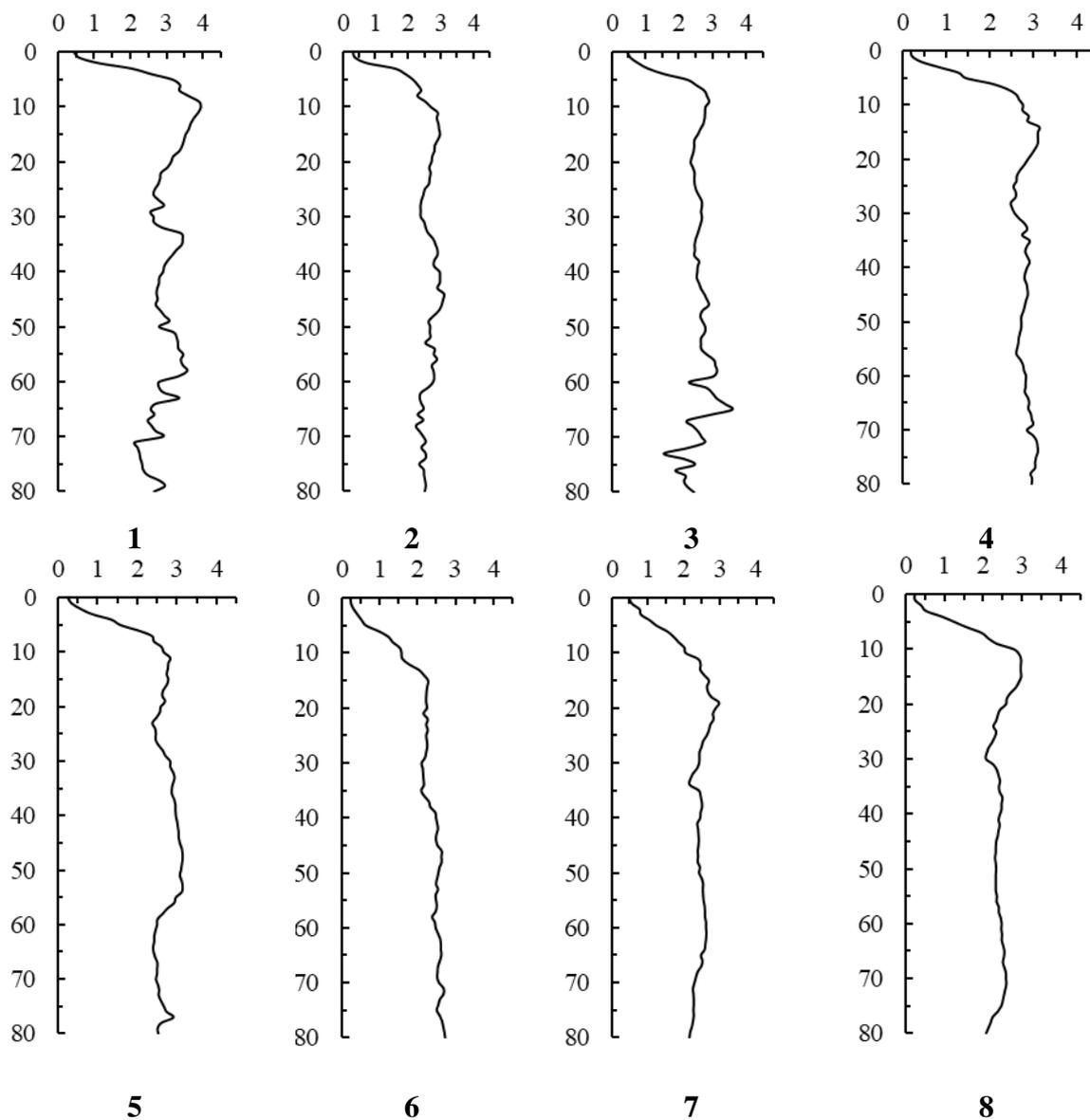


Рисунок 5 – Изменение твёрдости почвы с глубиной на восьми выделенных закреплённых участках (1–8), мПа

Таблица 2 – Связь агрофизических параметров почвы и NDVI в агроценозе овса

Показатель	Плотность почвы, г/см ³			Твёрдость почвы, МПа			Влажность почвы, %		
	5–10	15–20	25–30	5–10	15–20	25–30	5–10	15–20	25–30
Корреляция с NDVI (r)	-0,52	-0,18	-0,11	-0,43	-0,14	-0,52	0,07	0,35	0,65

Между твёрдостью почвы и NDVI агроценоза овса выявлена средняя обратная связь. Особенно выраженной она оказалась в верхнем 5–10 см слое почвы ($r = -0,43$) и более глубоком (25–30 см) горизонте ($r = -0,52$), что, вероятно, связано с отрицательным воздействием высокой твердости почвы на рост и развитие корневой системы овса в «плужных подошвах».

Повторное инструментальное определение NDVI агроценоза овса в фазе вымётывания–цветения (первое июля) и анализ спутниковых снимков подтвердили сохранившуюся неоднородность фитомассы по фиксированным экспериментальным участкам поля, хотя размах его вариации стал менее выраженным. Следует отметить, что выявлена совместная вариация числовых рядов NDVI, определённых в фазе начала выхода в трубку (10 июня) и вымётывания–цветения (первое июля). Их связь сильная, с коэффициентом корреляции 0,88 (рисунок 6).

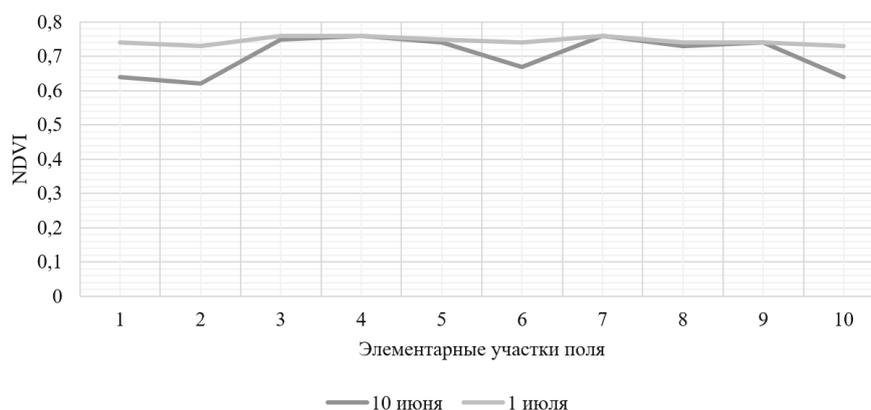


Рисунок 6 – Визуализация совместной вариации числовых рядов NDVI, определённых в агроценозе овса в фазе начала выхода в трубку (10 июня) и вымётывания–цветения (первое июля), 2022 г.

Примечательно, что на экспериментальных участках с наименьшей твёрдостью почвы уже к фазе начала выхода в трубку сформировалась самая высокая за всю вегетацию фитомасса овса, соответствующая значениям NDVI на уровне 0,67–0,74. К моменту максимального развития растений (фаза вымётывания–цветения) прирост фитомассы на этих участках оказался незначительным (на 0,04–0,06 единиц NDVI). Напротив, на участках с более высокими показателями плотности почвы, имевшими на первоначальном этапе вегетации низкие показатели NDVI, отмечено их увеличение на 0,14–0,24 единиц, при этом в целом они оказались ниже, чем на участках с меньшей твёрдостью почвы (0,52–0,55).

Таким образом, проведённые в степной зоне Оренбургского Предуралья исследования позволили установить приемлемость современных инструментальных методов определения агрофизических свойств почвы и фитометрических параметров посевов с помощью портативных устройств, их простоту и оперативность. Подтверждена высокая схожесть результатов определения NDVI по спутниковым снимкам и полученным в процессе наземного сканирования. Выявлена зависимость фитометрических параметров агроценоза овса (по NDVI) от агрофизических параметров почвы. Отмечена наиболее выраженная обратная связь ($r = -0,52$) NDVI с плотностью верхнего (5–10 см) почвенного горизонта и твёрдостью слоёв почвы 5–10 см ($r = -0,43$) и 25–30 см ($r = -0,52$), наиболее вероятно связанная с переходом на прямой посев в современных агротехнологиях и наследием глубоких обработок в ретроспективе, способствовавших уплотнению почвы в этих горизонтах.

Выводы

Определение агрофизических свойств почвы и фитометрических параметров посевов современными портативными устройствами может успешно применяться для агрофизической экспресс-оценки почв сельскохозяйственных угодий.

В качестве наиболее информативного показателя следует использовать твёрдость почвы, имеющую выраженную обратную связь с NDVI в наиболее «проблемных» почвенных горизонтах – 5–10 см ($r = -0,43$) и 25–30 см ($r = -0,52$). Они отличаются наличием уплотнённых слоёв, что является результатом перехода с относительно недавнего времени (15–20 лет) на прямой посев сеялками со стрельчатыми лапами (5–10 см) и наследия длительной глубокой обработки почвы с оборотом пласта (25–30 см).

Представленные в статье экспериментальные данные могут служить дополнительным аргументом, подтверждающим целесообразность сочетания прямого посева, минимальных и глубоких обработок почвы в севообороте, использования сеялок с разными типами сошников, сеялки с анкерными сошниками в технологиях прямого посева или сеялок с дисковыми сошниками в технологиях strip-till, исключающих образование выраженного уплотнения почвы в отдельных горизонтах, препятствующего более полному развитию фитомассы полевых культур

В настоящей статье представлены материалы продолжающихся исследований по научному обоснованию приемов адаптации элементов «цифровых технологий» в ландшафтно-адаптивное земледелие степной зоны. Данные исследования развиваются в направлении конвергенции ДЗЗ, мониторинга фитометрических показателей посевов и агрофизических параметров почвы портативными измерительными устройствами. Их результаты станут существенным дополнением к формирующейся базе данных для выработки рекомендаций по дифференциации норм технологического воздействия для конкретных почвенно-климатических условий региона в зависимости от сочетания указанных характеристик посева и почвы.

Исследование выполнено в рамках НИР ОФИЦ УрО РАН (ИС УрО РАН) «Проблемы степного природопользования в условиях современных вызовов: оптимизация взаимодействия природных и социально-экономических систем», № ГР АААА-А21-121011190016 -1.

Литература

1. Vecchio Y., De Rosa M., Adinolfi F., Bartoli L., Masi M. Adoption of precision farming tools: a context-related analysis // Land Use Policy. 2020. Vol. 94. Art. No. 104481. DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.104481.
2. Гамзиков Г. П. Точное земледелие в Сибири: реальность, проблемы и перспективы // Земледелие. 2022. № 1. С. 3–9. DOI: 10.24412/0044-3913-2022-1-3-9.
3. Гулянов Ю. А. Мониторинг фитометрических параметров с использованием инновационных методов сканирования посевов // Таврический вестник аграрной науки. 2019. № 3 (19). С. 64–76. DOI: 10.33952/2542-0720-2019-3-19-64-76.
4. Budzko V., Medennikov V. Mathematical modeling of evaluating the effectiveness of using RSD data in precision farming // Procedia Computer Science. 2021. Vol. 190. P. 122–129. DOI: 10.1016/j.procs.2021.06.015.
5. Бухориев Т. А., Тухтаев М. О. Фитометрические параметры озимой пшеницы в зависимости от сроков сева // Аграрная наука. 2012. № 10. С. 10–11.
6. Mahjenabadi V., Mousavi S., Rahmani A., Karami A., Rahmani H., Khavazi K., Rezaei M. Digital mapping of soil biological properties and wheat yield using remotely sensed, soil chemical data and machine learning approaches // Computers and Electronics in Agriculture. 2022. Vol. 197. Art. No. 106978. DOI: 10.1016/j.compag.2022.106978.
7. Гулянов Ю. А. Перспективы использования информационных ресурсов ДЗЗ для управления производственным процессом полевых агроценозов // Земледелие. 2022. № 2. С. 26–31. DOI: 10.24412/0044-3913-2022-2-26-31.

8. Шерстобитов С. В. Эффективность дифференцированного внесения азотных удобрений в режиме OFF-LINE в условиях Западной Сибири // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. № 5 (91). С. 22–26. DOI: 10.37670/2073-0853-2021-91-5-22-26.
9. Dexter A. R., Czyż E. A., Gaę O. P. A method for prediction of soil penetration resistance // Soil and Tillage Research. 2007. No. 93(2). P. 412–419. DOI: 10.1016/j.still.2006.05.011.
10. Reichert J. M., Morales C. A. S., de Bastos F., Sampietro J. A., Cavalli J. P., de Araújo E. F., Srinivasan R. Tillage recommendation for commercial forest production: should tillage be based on soil penetrability, bulk density or more complex, integrative properties? // Geoderma Regional. 2021. No. 25. Art. No. e00381. DOI: 10.1016/j.geodrs.2021.e00381.
11. Трофимова Т. А., Коржов С. И., Гулевский В. А., Образцов В. Н. Оценка степени физической деградации и пригодности черноземов к минимизации основной обработки почвы // Почвоведение. 2018. № 9. С. 1125–1131. DOI: 10.1134/S0032180X18090125
12. Bengough A. G., McKenzie B. M., Hallett P. D., Valentine T. A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits // Journal of Experimental Botany. 2011. No. 62(1). P. 59–68. DOI: 10.1093/jxb/erq350.
13. Агрофизика: учебное пособие // Под ред. Шеина Е. В. [и др.]. Владимир: Издательство Владимирского ГУ, 2014. 92 с.
14. Бакиров Ф. Г., Нестеренко Ю. М., Поляков Д. Г., Халин А. В. Равновесная плотность почвы: анализ дефиниций и методология // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2018. № 2 (70). С. 11–13.
15. Медведев И. Ф., Назаров В. А., Губарев Д. И., Жолинский Н. М., Деревягин С. С. Изменение агрофизических и агрохимических свойств чернозёма южного при различных способах основной обработки почвы // Аграрный научный журнал. 2017. № 2. С. 14–19.
16. Максютов Н. А., Жданов В. М., Скороходов В. Ю., Кафтан Ю. В., Митрофанов Д. В., Зенкова Н. А., Жижин В. Н. Влагосберегающие приёмы и технологии в земледелии Оренбуржья // Зерновое хозяйство России. 2015. № 6 (94). С. 143–150.
17. Yang Y., Ding J., Zhang Yu., Wu J., Zwang J., Pan X., Gao C., Wang Y., He F. Effects of tillage and mulching measures on soil moisture and temperature, photosynthetic characteristics and yield of winter wheat // Agricultural Water Management. 2018. Vol. 201. P. 299–308. DOI: 10.1016/j.agwat.2017.11.003.
18. Качинский Н. А. Физика почвы. Ч.1. М.: Высшая школа, 1965. 321 с.
19. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
20. Кузнецова И. В., Азовцева Н. А., Бондарев А. Г. Нормативы изменения физических свойств почв степной, сухостепной, полупустынной зон европейской территории России // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. 2011. Вып. 67. С. 3–19. DOI: 10.19047/0136-1694-2011-67-3-19.

References

1. Vecchio Y., De Rosa M., Adinolfi F., Bartoli L., Masi M. Adoption of precision farming tools: a context-related analysis // Land Use Policy. 2020. Vol. 94. Art. No. 104481. DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.104481.
2. Gamzikov G. P. Precision farming in Siberia: realities, challenges and prospects // Zemledelie. 2022. No. 1. P. 3–9. DOI: 10.24412/0044-3913-2022-1-3-9.
3. Gulyanov Yu. A. Monitoring of the phytometric indications using innovative crop scanning methods // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2019. No. 3 (19). P. 64–76. DOI: 10.33952/2542-0720-2019-3-19-64-76.
4. Budzko V., Medennikov V. Mathematical modeling of evaluating the effectiveness of using RSD data in precision farming // Procedia Computer Science. 2021. Vol. 190. P. 122–129. DOI: 10.1016/j.procs.2021.06.015.
5. Bukhoriev T. A., Tukhtaev M. O. Phytometric parameters of winter wheat in depending on sowing terms // Agrarian Science. 2012. No. 10. P. 10–11.
6. Mahjenabadi V., Mousavi S., Rahmani A., Karami A., Rahmani H., Khavazi K., Rezaei M. Digital mapping of soil biological properties and wheat yield using remotely sensed, soil chemical data and machine learning approaches // Computers and Electronics in Agriculture. 2022. Vol. 197. Art. No. 106978. DOI: 10.1016/j.compag.2022.106978.
7. Gulyanov Yu. A. Prospects of using remote sensing information resources for managing the production process of field agrocenoses // Zemledelie. 2022. No. 2. P. 26–31. DOI: 10.24412/0044-3913-2022-2-26-31.
8. Sherstobitov S. V. Efficiency of differentiated application of nitrogen fertilizers in the off-line mode in the conditions of Western Siberia // Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2021. No. 5 (91). P. 22–26. DOI: 10.37670/2073-0853-2021-91-5-22-26.
9. Dexter A. R., Czyż E. A., Gaę O. P. A method for prediction of soil penetration resistance // Soil and Tillage Research. 2007. No. 93(2). P. 412–419. DOI: 10.1016/j.still.2006.05.011.
10. Reichert J. M., Morales C. A. S., de Bastos F., Sampietro J. A., Cavalli J. P., de Araújo E. F., Srinivasan R. Tillage recommendation for commercial forest production: should tillage be based on soil

penetrability, bulk density or more complex, integrative properties? // Geoderma Regional. 2021. No. 25. Art. No. e00381. DOI: 10.1016/j.geodrs.2021.e00381.

11. Trofimova T. A., Korzhov S. I., Gulevskii V. A., Obraztsov V. N. Assessing the degree of physical degradation and suitability of chernozems for the minimization of basic tillage // Eurasian Soil Science. 2018. No. 51 (9). P. 1080–1085. DOI: 10.1134/S1064229318090120.

12. Bengough A. G., McKenzie B. M., Hallett P. D., Valentine T. A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits // Journal of Experimental Botany. 2011. No. 62(1). P. 59–68. DOI:10.1093/jxb/erq350.

13. Agrophysics: a textbook // Ed. by Shein E. V. [et al.]. Vladimir: Vladimir State University Publ., 2014. 92 p.

14. Bakirov F. G., Nesterenko Yu. M., Polyakov D. G., Khalin A. V. The balanced soil density: analysis of definitions and methodology // Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2018. No. 2 (70). P. 11–13.

15. Medvedev I. F., Nazarov V. A., Gubarev D. I., Zholinskiy N. M., Derevyagin S. S. Change of agrophysical and agrochemical properties of chernozem south in different ways of primary tillage // The Agrarian Scientific Journal. 2017. No. 2. P.14–19.

16. Maksyutov N. A., Zhdanov V. M., Skorokhodov V. Yu., Kaftan Yu. V., Mitrofanov D. V., Zenkova N. A., Zhizhin V. N. Moisture saving methods and technologies in Orenburg agriculture // Grain Economy of Russia. 2015. No. 6 (94). P. 143–150.

17. Yang Y., Ding J., Zhang Yu., Wu J., Zwang J., Pan X., Gao C., Wang Y., He F. Effects of tillage and mulching measures on soil moisture and temperature, photosynthetic characteristics and yield of winter wheat // Agricultural Water Management. 2018. Vol. 201. P. 299–308. DOI: 10.1016/j.agwat.2017.11.003.

18. Kachinsky N. A. Soil physics. Part 1. Moscow: Vysshaya skola, 1965. 321 p.

19. Dospekhov B. A. Methods of field research (with the basics of statistical processing of research results). Moscow: Agropromizdat, 1985. 351 p.

20. Kuznetsova I. V., Azovtseva N. A., Bondarev A. G. Norms of change of physical properties of soils of steppe, arid and semi-desert zones of European Russian territories // Dokuchaev Soil Bulletin. 2011. Vol. 67. P. 3–19. DOI: 10.19047/0136-1694-2011-67-3-19.

UDC 633.11: 551.5

Gulyanov Yu. A., Polyakov D.G.

DEPENDENCE OF PHYTOMETRIC PARAMETERS OF AGROCENOSSES ON AGROPHYSICAL INDICATORS OF SOIL

Summary. *An express-evaluation of the level of development of field agrocenoses phytomass and agrophysical soil indicators is necessary for rapid technological optimization of the growing conditions of crops in order to more fully realize their productive potential, as well as to preserve and reproduce soil fertility. The research was carried out in 2020–2022 at the experimental field of the Orenburg State Agrarian University. The objects of research were the normalized difference vegetation index (NDVI) of agrocenoses of winter wheat (*Triticum aestivum* L.), spring wheat (*Triticum aestivum* L.), oat (*Avena sativa* L.) cultivated under minimum tillage technology and soil agrophysical parameters (hardness, humidity, density) at the experimental site. NDVI was determined using remote sensing data and a hand-held sensor Green Seeker Handheld Crop Sensor, Model HCS-100. The penetrometer Eijkelkamp 06.15.SA was used to determine the hardness of the soil; the density of the arable soil layer was determined by N.A. Kachinsky drilling method; soil moisture was determined by the thermostatic-weight method. Digital material was processed using generally accepted methods of statistical analysis. We have established the acceptability of modern instrumental methods (using portable devices) for determining phytometric parameters of crops and agrophysical properties of soils; the undoubted advantages of these devices are their ease of use and speed of obtaining results. The high convergence between the results of NDVI determination using satellite images and those obtained by ground scanning was confirmed. The dependence of phytometric parameters of oat agrocenosis (according to NDVI) on agrophysical indicators of the soil was revealed. The most pronounced inverse relationship ($r = -0.52$) was observed between NDVI and the density of the upper soil horizon (5–10 cm), as well as between NDVI and the hardness of the soil layers: 5–10 cm*

($r = -0.43$) and 25–30 cm ($r = -0.52$). With a certain degree of conditionality, this connection can be explained by the transition to direct sowing in modern agricultural technologies and the legacy of deep tillage in retrospect, which created a compacted soil layer in these horizons.

Keywords: remote sensing data, phytometric parameters of crops, agrophysical properties of soil, penetration resistance, oat (*Avena sativa* L.).

Гулянов Юрий Александрович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела степеведения и природопользования, Институт степи Уральского отделения Российской академии наук (ИС УрО РАН) – обособленное структурное подразделение ФГБУН Оренбургского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (ОФИЦ РАН); 460000, Россия, г. Оренбург, ул. Пионерская, 11; e-mail: iury.gulyanov@yandex.ru.

Поляков Дмитрий Геннадьевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела степеведения и природопользования, Институт степи Уральского отделения Российской академии наук (ИС УрО РАН) – обособленное структурное подразделение ФГБУН Оренбургского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (ОФИЦ РАН); 460000, Россия, г. Оренбург, ул. Пионерская, 11; e-mail: electropismo@yandex.ru.

Gulyanov Yuriy Aleksandrovich, Dr. Sc. (Agr.), professor, senior researcher of the Department of steppe studying and environmental management, Institute of the Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – a separate unit of the Federal State Budgetary Scientific Institution “Orenburg Federal Research Center” of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 11, Pioneer str., Orenburg, 460000, Russia; e-mail: iury.gulyanov@yandex.ru.

Polyakov Dmitriy Gennadievich, Cand. Sc. (Biol.), senior researcher of the Department of steppe studying and environmental management, Institute of the Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – a separate unit of the Federal State Budgetary Scientific Institution “Orenburg Federal Research Center” of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 11, Pioneer str., Orenburg, 460000, Russia; e-mail: electropismo@yandex.ru.

Дата поступления в редакцию – 15.02.2023.

Дата принятия к печати – 16.03.2023.