

DOI 10.33952/2542-0720-2021-3-27-47-60

УДК 631/635:632.08:633.1

Гулянов Ю. А.¹, Николаев Н. А.², Яковлев И. Г.¹

СОРТОВАЯ СПЕЦИФИЧНОСТЬ ОПТИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ФИТОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОСЕВОВ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ

¹Институт степи Уральского отделения Российской академии наук (ИС УрО РАН) – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Оренбургского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (ОФИЦ РАН);

²ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет»

Реферат. Выявление сортовой специфичности оптико-биологических свойств полевых культур необходимо для правильной интерпретации спутниковых снимков, оперативного определения фитометрических параметров посевов, индикации уровня их развития и обоснования корректирующих технологических решений. Цель исследований заключалась в проведении оценки оптико-биологических свойств и фитометрических параметров разнообразных сортов озимой пшеницы, выявлении их связи и межсортовой варибельности в высокотехнологичных эталонных посевах на основе спутникового и наземного мониторинга. Полевые исследования проводили в 2019–2020 гг. на участке конкурсного экологического сортоиспытания, заложенном на учебно-опытном поле Оренбургского ГАУ, в зоне южных степей Оренбургского Предуралья. Агроценозы различных сортов озимой пшеницы заметно различаются по оптико-биологическим свойствам, выражающимся в величинах нормализованного вегетационного индекса (NDVI). Наименьшими средними за вегетацию значениями NDVI (0,57–0,59) характеризовались сорта Гром, Дон 95, Быстрица, Спартак, Станичная и Синтетик. Более высокие значения NDVI (0,67) наблюдали в посевах сортов Жемчужина Поволжья, Колос Оренбуржья, Оренбургская 105, Рифей и Пионерская 32. Варибельность между сортами по наименьшему (0,51 – Гром, 0,52 – Дон 95) и наибольшему (0,69 – Колос Оренбуржья, 0,70 – Пионерская 32, 0,69 – Оренбургская 105) значениям NDVI в период максимального развития ассимиляционного аппарата достигала 0,17–0,19 единиц (фаза полного весеннего кущения). К фазе колошения, когда NDVI составлял 0,78–0,79 и 0,85 единиц соответственно, указанная разница несколько нивелировалась, но в целом оставалась весомой – на уровне 0,08–0,11 единиц (10,9–14,9 %). Наибольшей площадью листовой поверхности (30 тыс. м²/га) характеризовались посевы сортов Саратовская 17, Колос Оренбуржья, Оренбургская 105, Рифей и Пионерская 32. Прямой межсортовой зависимости между площадью листовой поверхности и нормализованным вегетационным индексом посевов (NDVI) озимой пшеницы не выявлено ($R^2=0,38$).

Ключевые слова: агроценозы, оптико-биологические свойства, фитометрические параметры, космический мониторинг, степная зона, озимая пшеница *Triticum aestivum* L.

Для цитирования: Гулянов Ю. А., Николаев Н. А., Яковлев И. Г. Сортная специфичность оптико-биологических свойств и фитометрических параметров посевов озимой пшеницы // Таврический вестник аграрной науки. 2021. № 3(27). С. 47–60. DOI: 10.33952/2542-0720-2021-3-27-47-60.

For citation: Gulyanov Yu. A., Nikolaev N. A., Yakovlev I. G. Varietal specificity of opto-biological properties and phytometric parameters of winter wheat crops // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2021. No. 3(27). P. 47–60. DOI: 10.33952/2542-0720-2021-3-27-47-60.

Введение

Развитие космической отрасли и расширение доступности её информационной базы для сельскохозяйственного производства открывает широкие возможности по оценке состояния растительного покрова посредством использования различных показателей.

Наиболее известным и достаточно широко апробированным из них является нормализованный вегетационный индекс посевов (NDVI), характеризующий интенсивность развития фотосинтетически активной биомассы растений. Его рассчитывают на основе космических снимков (ДДЗ) или снимков с беспилотных летательных аппаратов (БЛА) с помощью специализированных программных продуктов, позволяющих обрабатывать и визуализировать цифровую информацию [1, 2]. Для детальной оценки состояния растительности полевых агроценозов проводят их регулярный мониторинг и тщательный анализ полученных данных [3].

Спутники и БЛА осуществляют пассивную съёмку отражений местности в заданных диапазонах световых волн, что в условиях недостаточной или неравномерной освещённости может приводить к существенному искажению «реальной» картины [4]. Установление достоверных связей между характеристиками космических снимков и фактическим состоянием растительности обеспечивается проведением дополнительных наземных измерений на тестовых участках [5]. Для наземной оценки состояния посевов используют активные оптические датчики с собственным источником излучения, дающие более точный результат. Их применяют также для уточнения и поправки спутниковых данных или фотокамер NIR-диапазона беспилотных летательных аппаратов, обладающих высокой производительностью, оперативностью и способностью работать в «невыездных» условиях [6, 7].

За истекшие несколько десятилетий мировым научным сообществом накоплен достаточно обширный и разноплановый экспериментальный материал, касающийся обозначенных вопросов. Разработаны научные подходы к оценке качества пахотных земель на основе анализа временной динамики вегетационного индекса (NDVI) различных полевых культур и межгодовой вариабельности его сезонного максимума, используемого в качестве индикатора состояния посевов и урожайности [8, 9]. Обоснована перспективность применения данных ДДЗ для определения потребности растений в азотном питании [10] и использования портативных оптических устройств для измерения вегетационного индекса (NDVI) наземным способом [4]. Предпринимаются попытки моделирования динамики NDVI, определения времени наступления его максимальных значений и прогнозирования сроков уборки [2]. Развиваются методы точного фенологического мониторинга [11] и автоматического распознавания полевых культур (в частности озимой пшеницы), оценки состояния растений, в том числе на основе имитационных моделей их развития [12]. Апробируются на аналогах-ландшафтах результаты применения индекса NDVI для оценки состояния земель различного сельскохозяйственного использования с визуализацией результатов в виде мониторинговых цветокодированных растровых карт [13].

По современным научным представлениям полевой агроценоз рассматривается в виде оптико-биологической фотосинтезирующей системы, максимальная продуктивность которой достигается при формировании оптимального по размерам и по продолжительности активной работы ассимиляционного аппарата (площади листовой поверхности) [14]. Признётся, что подобное состояние агробиоценоза обеспечивается при оптимальном сочетании внешних и внутренних факторов, включающих интенсивность солнечного излучения, температуру и влажность воздуха, плодородие почвы, количество и

периодичность выпадения атмосферных осадков. Не меньшее влияние на фитометрические параметры посевов оказывают биологические и морфологические особенности растений, в том числе число листьев, соотношение надземной и подземной биомассы, архитектура растений [15, 16]. Последние из перечисленных факторов имеют вполне очевидную видовую и сортовую специфичность.

Формирование необходимого объёма информации по оптико-биологическим свойствам агроценозов, определение направленности и силы их связи с фитометрическими параметрами, выявление межвидовой и особенно межсортовой идентичности, пока предполагает большой объём «наземной» ручной работы. Она строится на использовании классических методов определения площади листовой поверхности (линейного, весового) и инструментального измерения NDVI устройствами с активными оптическими датчиками.

Обзор литературных источников свидетельствует о проведении многочисленных полевых исследований, включающих изучение специфических спектральных характеристик различных видов полевых культур [17], в том числе произрастающих в зонах, отличающихся природными и агроклиматическими условиями [18, 19]. При этом исследования, касающиеся сортовой идентичности оптико-биологических свойств и фитометрических параметров высокотехнологичных агроценозов, выступающих в роли эталонных посевов и служащих экспериментальными площадками для отработки отдельных элементов «умного земледелия», развёрнуты пока не достаточно широко.

Поэтому выявление, разработка, научное обоснование принципов оценки растительного покрова земледельческих угодий и их производственная апробация на основе новейших методов «умного земледелия» являются актуальным научным направлением.

Целесообразность указанных исследований ещё более возрастает в степных, наиболее антропогенно деградированных земледельческих территориях, где выведение из оборота нарушенных земель предполагает существенное повышение продуктивности остающихся в обработке устойчивых, высокоплодородных угодий, чему безусловно будет способствовать «привлечение» интеллектуальных мониторинговых приёмов [20, 21].

Цель исследований – проведение индивидуальной оценки оптико-биологических свойств и фитометрических параметров разнообразных сортов озимой пшеницы, выявление их связи и межсортовой вариативности в высокотехнологичных эталонных посевах на основе спутникового и наземного мониторинга.

Для выполнения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- сформировать базу данных нормализованного вегетационного индекса посевов (далее NDVI) различных сортов озимой пшеницы, выявить его динамику в осенний и весенне-летний периоды;
- определить межсортовую вариативность оптико-биологических свойств (по NDVI) и фитометрических параметров (по площади листьев);
- выявить взаимосвязь площади листовой поверхности и NDVI в высокотехнологичных эталонных посевах, установить сортовую специфичность указанных взаимосвязей.

Материалы и методы исследований

Полевые исследования с озимой пшеницей проводили в 2019–2020 гг. на участке конкурсного экологического сортоиспытания, заложенном на учебно-опытном поле Оренбургского ГАУ, в зоне южных степей Оренбургского Предуралья (рисунок 1).

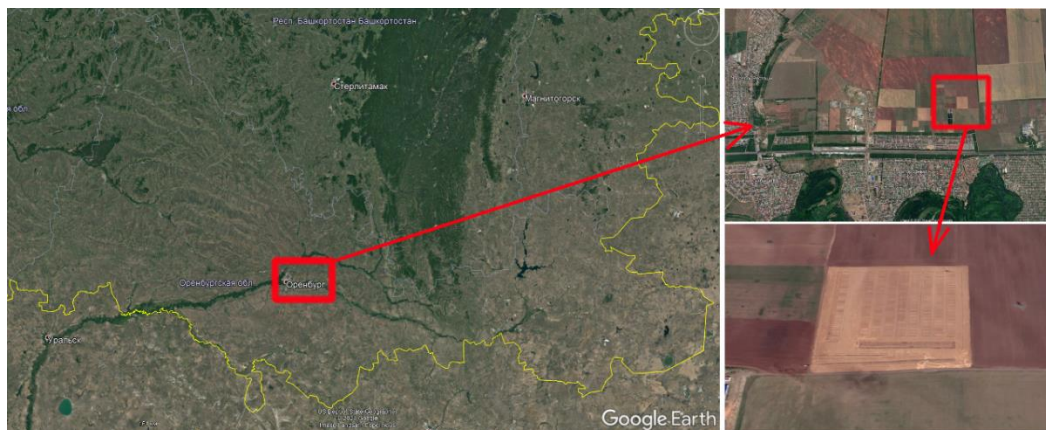


Рисунок 1 – Пространственное месторасположение объекта исследований, центральная почвенно-климатическая зона Оренбургской области

Почва опытного участка представлена чернозёмом южным среднemosным карбонатным тяжелосуглинистым, с содержанием гумуса в пахотном слое почвы 3,8 % (по методу И. В. Тюрина в модификации ЦИНАО), подвижного фосфора (P_2O_5 , по методу Б. П. Мачигина в модификации ЦИНАО) – 3,25 мг и обменного калия (K_2O , по методу Б. П. Мачигина в модификации ЦИНАО) – 27,0 мг на 100 г почвы, при мощности гумусового горизонта 114–118 см и щелочной реакции почвенной среды ($pH = 7,6–7,8$, потенциометрическим методом). Зона исследований характеризуется недостаточным и неустойчивым атмосферным увлажнением. Среднегодовое количество атмосферных осадков составляет около 340 мм в год, из которых не более 120 мм (35,0 %) выпадает за период с мая по август в основном в виде непродолжительных дождей ливневого характера. Среднегодовая температура воздуха составляет около 6,0 °С, сумма активных температур (выше 10 °С) – 2900–3000 °С. Средняя температура самого холодного месяца года (январь) равна минус 13,3 °С, а самого тёплого (июль) – 23,1 °С. Дополнительную напряжённость водному режиму территории придаёт повышенная ветровая активность, увеличивающая непродуктивные потери влаги на испарение. Морозная и не всегда снежная зима продолжается более пяти месяцев. Короткая, как правило, дружная весна быстро сменяется жарким засушливым летом, переходящим в продолжительную тёплую и сухую осень.

Метеорологические условия в период проведения исследований в сравнении со средними значениями характеризовались меньшей на 53 °С (1,6 %) суммой активных температур и меньшим на 22,1 мм (12,1 %) количеством атмосферных осадков, что определило близкие к среднемноголетним параметрам гидротермические условия. ГТК (гидротермический коэффициент) Селянинова, при средних для зоны исследований значениях 0,55 мм/°С составил 0,49 мм/°С и характеризовал условия увлажнения как очень засушливые, характерные для зоны.

Проведено изучение 28 сортов озимой мягкой пшеницы, представленной для экологического сортоиспытания различными селекционными центрами, включая ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской»» и ГНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт зерновых культур им. И. Г. Калининко» (Ростовская область); ФГБНУ «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Юго-Востока», ФГБНУ «Ершовская опытная станция орошаемого земледелия научно-исследовательского института сельского хозяйства Юго-Востока» (Саратовская область); ФГБНУ «Пензенский Научно-исследовательский институт сельского хозяйства» (Пензенская область); ФГБНУ «Национальный центр зерна имени

П. П. Лукьяненко» (Краснодарский край); ФГБНУ «Белгородский Федеральный аграрный научный центр РАН» и ООО «Семена России» (Белгородская область); ФГБНУ «Северо-Кавказский Федеральный научный аграрный центр» (Ставропольский край); ФГБОУ ВО «Оренбургский Государственный аграрный университет»; Селекционно-генетический институт – национальный центр семеноводства и сортоизучения (Украина). Посевы озимой пшеницы размещали по чёрному пару, технология возделывания включала общепринятые зональные агротехнические приёмы, проводимые на высоком технологическом уровне.

Нормализованный вегетационный индекс посевов определяли за период с августа 2019 г. по июль 2020 г. на базе общедоступных космических снимков Landsat 8 и Sentinel-2, имеющих пространственное разрешение 15-30 м/пиксел, размещённых на on-line ресурсах OneSoil.ai и Sentinel-hub.com.

Для оперативного мониторинга и установления объективных связей между характеристиками космических снимков и фактическим состоянием растительности проводили дополнительное наземное сканирование биомассы портативным ручным сенсором Green Seeker, Model HCS-100 с активным источником излучения по фиксированному маршруту, закреплённому точками (рисунок 2).



А



Б

Рисунок 2 – Определение нормализованного вегетационного индекса портативным устройством Green Seeker Handheld, Model HCS-100 (А), экспериментальное поле озимой пшеницы в фазе цветения (Б)

Полученные данные наносили на картографическую основу в программном комплексе NextGIS с последующей обработкой в ArcMap.

Средние за вегетационный период значения нормализованного вегетационного индекса посевов (NDVI) каждого сорта определяли как средние по результатам обработки 15-ти за период вегетации спутниковых снимков (пять – в осеннюю вегетацию и десять – в весенне-летнюю).

Площадь листовой поверхности определяли линейно-весовым методом в период максимального развития ассимиляционного аппарата (в начале фазы цветения). Для измерения массы листьев использовали электронные весы (Electronic balance, Type CBL 2200H) с точностью измерения 0,01 г.

При обработке цифрового материала использовали общепринятые статистические методы – определяли дисперсию экспериментальных данных, проводили их корреляционный и регрессионный анализ.

Результаты и их обсуждение

В ходе проведения полевого эксперимента сформирована обширная база данных NDVI посевов озимой пшеницы, определена его динамика в осенний и

весенне-летний период вегетации, а также выявлена межсортовая вариабельность и сортовая специфичность фитометрических параметров (рисунок 3).

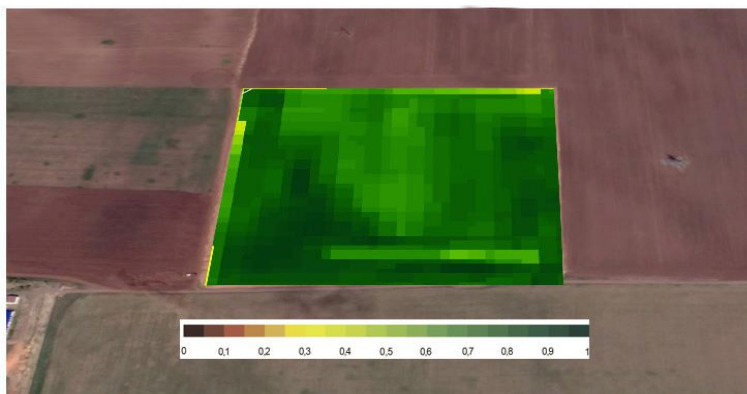


Рисунок 3 – Пространственное распределение нормализованного вегетационного индекса (NDVI) на опытном поле озимой пшеницы в период максимального развития ассимиляционного аппарата

Графическое выражение представленных во временном развитии величин NDVI указывает на их значительную динамику в течение вегетации, особенно в поздне-осенний и ранне-весенний периоды. С начала формирования всходов отмечен устойчивый рост фитометрических параметров посевов. Он сопровождался последовательным нарастанием NDVI, достигающим к завершению осенней вегетации (при переходе среднесуточной температуры воздуха через отметку 5 °С) 0,70–0,71 единиц. За период продолжающейся более пяти месяцев зимовки, в силу физиологических и иных причин, растения озимой пшеницы теряют значительную часть надземной биомассы. В результате этого при возобновлении весенней вегетации NDVI оказался ниже почти на 30,0 % и в среднем составил только 0,50–0,51 единиц (рисунок 4).

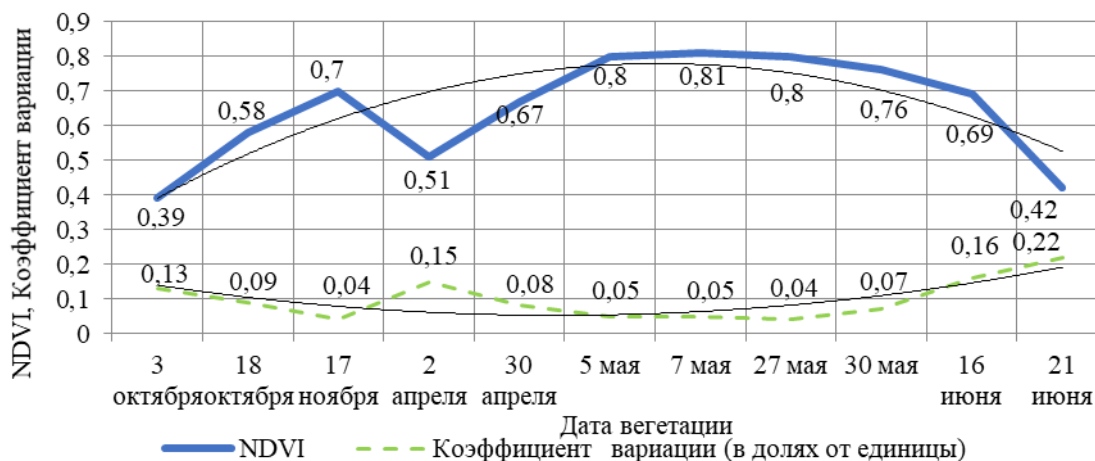


Рисунок 4 – Динамика нормализованного вегетационного индекса (NDVI) посевов озимой пшеницы в условиях степной зоны Оренбургского Предуралья (2019/2020 сельскохозяйственный год)

В условиях достаточного почвенного увлажнения, при активном нарастании солнечного тепла, характерном для большинства земельных территорий Оренбургского Предуралья, предзимние размеры растительной биомассы восстанавливались в течение первых двух-трёх недель вегетации. К завершению

фазы весеннего кущения, отмечаемой чаще всего в конце апреля–начале мая, фитометрические параметры посевов достигали максимальных за вегетацию значений. В течение последующих четырех-пяти недель, до завершения фазы колошения, размеры ассимиляционного аппарата сохранялись на самом высоком уровне, а NDVI посевов достигал 0,80–0,81 единиц и более. В период налива зерна, сопровождающийся перераспределением пластических веществ и последовательным усыханием нижних листьев, фитометрические параметры посевов снижались. В фазе молочно-восковой спелости зерна NDVI составил только 0,40–0,42 единицы.

Вариабельность NDVI в отдельные периоды вегетации озимой пшеницы имеет различные значения. Наибольшую стабильность отмечали в периоды максимального развития вегетативной массы, соответствующие фазе полного осеннего кущения и периоду от весеннего кущения до начала цветения в весенне-летнюю вегетацию. Коэффициент вариации NDVI в эти фазы не превышал 10,0 % (3,7–7,1 %), а в начале (всходы) и конце вегетации (молочно-восковая спелость зерна) приближался к 20,0 % (13,0–22,2 %).

Примечательно, что посевы различных сортов озимой пшеницы, имеющие в целом схожую направленность динамики фитометрических параметров в течение вегетации, заметно различались размерами ассимиляционного аппарата, выражающегося в величинах NDVI (рисунок 5).

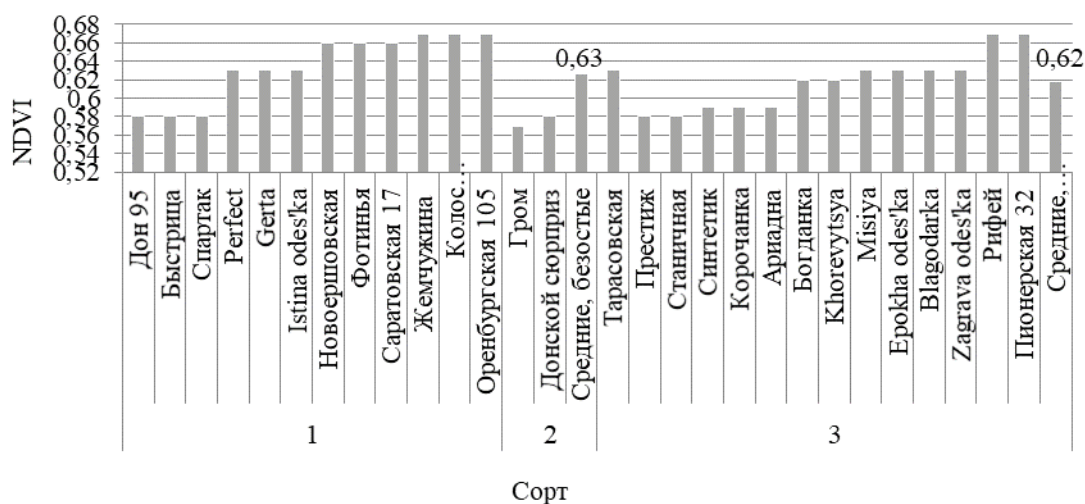


Рисунок 5 – Вариабельность средних за вегетацию значений NDVI в разрезе отдельных сортов озимой пшеницы (2019/2020 сельскохозяйственный год)

Примечание. 1 – безостые; 2 – безостые короткостебельные; 3 – остистые.

Из группы безостых наименьшие значения NDVI отмечены в посевах сортов Дон 95, Быстрица и Спартак, составившие в среднем за вегетацию 0,58 единиц. Аналогичные значения NDVI (0,58–0,59) зафиксированы также в посевах остистых сортов Станичная и Синтетик. Более низкую (0,57) величину данного показателя наблюдали на делянках короткостебельного сорта Гром. Наибольшими значениями NDVI (0,67) характеризовались посевы сортов Жемчужина Поволжья, Колос Оренбуржья и Оренбургская 105, а также Рифей и Пионерская 32 из группы остистых сортов. В целом между средними за вегетацию значениями NDVI группы остистых (0,62) и безостых (0,63) сортов весомой разницы не выявлено. Это указывает на несущественность влияния данного сортового признака на вегетационный индекс посевов озимой пшеницы.

В то же время разница между величинами NDVI отдельных сортов в период максимального развития ассимиляционного аппарата, соответствующий временному интервалу от фазы полного весеннего кущения до начала фазы цветения, оказалась более заметной (рисунок 6).

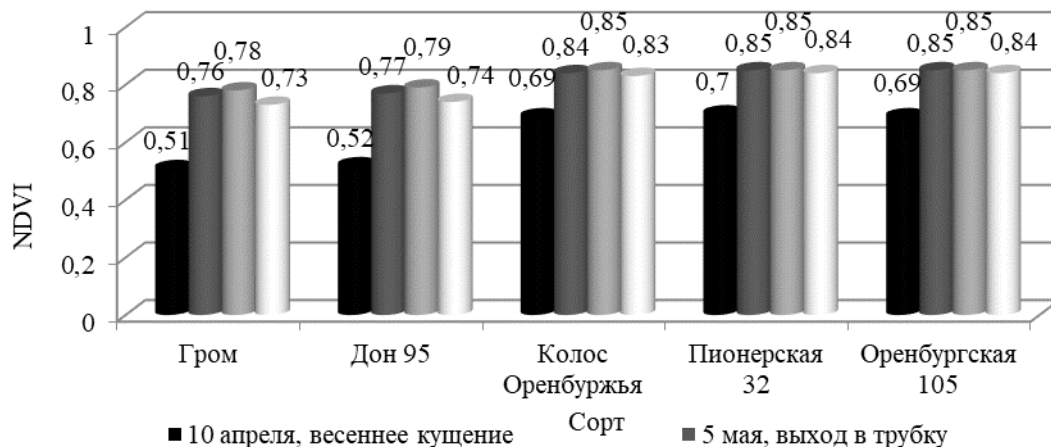


Рисунок 6 – Размах вариабельности NDVI по отдельным сортам озимой пшеницы в период максимального развития ассимиляционного аппарата (2019/2020 сельскохозяйственный год)

Так, размах вариабельности между сортами с наименьшими (Гром, Дон 95) и наибольшими (Колос Оренбуржья, Пионерская 32, Оренбургская 105) значениями NDVI в фазе полного весеннего кущения составил 0,17–0,19 единиц (33,3–36,5 %). В последующие фазы вегетации указанная разница несколько нивелировалась, но в целом осталась весомой, на уровне 0,08–0,11 единиц (10,9–14,9 %).

Сравнение экспериментальных сортов по площади листовой поверхности в период максимального развития ассимиляционного аппарата выявило её вариабельность с размахом 5680 м²/га, составившую более 20,0 % от средней по опыту. Незначительно большая средняя площадь листовой поверхности (27417 м²/га) отмечена в посевах безостых сортов, а в посевах остистых сортов она оказалась на 889 м²/га (3,2 %) ниже. Наибольшей в опыте площадью листовой поверхности, на уровне 30 тыс. м²/га, характеризовались посевы сортов Саратовская 17, Колос Оренбуржья, Оренбургская 105 (безостые), а также отличавшихся более мощным развитием на протяжении всей вегетации сортов Рифей и Пионерская 32 (остистые).

Следует особо подчеркнуть, что в ходе полевого эксперимента не выявлено сильной межсортовой связи площади листовой поверхности и NDVI, посевов свидетельствующей о влиянии на указанное соотношение специфических сортовых признаков, в частности интенсивности зелёного окрашивания, характера расположения и размера листьев, длины стебля и др. (таблица 1).

Установлено, что межсортовая вариация NDVI детерминирует не более 40,0 % межсортовой вариации площади листовой поверхности ($R^2 = 0,38$). Связь между указанными параметрами средняя ($r = 0,62$), описывается уравнением регрессии $y = 37397x - 3198$, где x – нормализованный вегетационный индекс (NDVI), y – площадь листовой поверхности. Размах вариации показателя, выражающего размер площади листовой поверхности, приходящейся на каждые 0,01 единиц NDVI, при средних по опыту величинах 334,3 м²/га, составил 53,2 м²/га (16,0 %).

Таблица 1 – Фитометрические параметры отдельных сортов озимой пшеницы в период максимального развития ассимиляционного аппарата (2019/2020 сельскохозяйственный год)

Сорт	Нормализованный вегетационный индекс (NDVI), ед.	Площадь листовой поверхности (ПЛ), м ² /га	Отношение ПЛ к NDVI, м ² /га на 0,01 ед. NDVI
безостые сорта			
Дон 95	0,79	26480	348,8
Быстрица	0,77	26965	350,2
Спартак	0,78	27112	347,6
Perfect	0,80	28168	352,1
Gerta	0,80	26648	320,5
Istina odes'ka	0,80	26976	304,7
Новоершовская	0,84	27022	321,7
Фотинья	0,83	28336	317,3
Саратовская 17	0,85	29546	347,6
Жемчужина Поволжья	0,84	27837	331,4
Колос Оренбуржья	0,85	29724	349,7
Оренбургская 105	0,85	29937	352,2
Гром	0,78	26302	343,6
Донской сюрприз	0,78	26637	344,7
Среднее	0,81	27417	338,0
остистые сорта			
Тарасовская остистая	0,82	25633	300,4
Престиж	0,77	26187	340,1
Станичная	0,79	26046	329,7
Синтетик	0,77	26118	339,2
Корочанка	0,79	26962	341,3
Ариадна	0,79	25453	322,2
Богданка	0,81	27637	341,2
Khorevytsya	0,79	24975	316,4
Misiya	0,81	26503	314,9
Ерoкha odes'ka	0,80	25312	316,4
Vlagodarka	0,79	25493	322,7
Zagrava odes'ka	0,81	27831	343,6
Рифей	0,84	29165	347,2
Пионерская 32	0,85	30056	353,6
Среднее	0,80	26528	330,6
Среднее по опыту	0,81	26972	334,3
Размах вариации	0,08	5680	53,2
Коэффициент вариации, %	3,3	6,0	4,7

Наибольшие значения указанного показателя (347,2–353,6 м²/га) отмечены в посевах ярко окрашенных сортов Саратовская 17, Колос Оренбуржья, Оренбургская 105, Рифей и Пионерская 32, характеризующихся одновременно высокими показателями NDVI (0,84–0,85 единиц) и площади листовой поверхности (29–30 тыс. м²/га). Примерно такими же величинами характеризовались посевы светло окрашенных сортов Дон 95, Быстрица, Спартак и Perfect, отличающиеся симметрично меньшими значениями NDVI (0,77–0,80 единиц) и меньшей (на 2,5 тыс. м²/га или 8,4%) площадью листовой поверхности. В то же время в эксперименте выявлены сорта, сформировавшие самую низкую площадь листовой поверхности, приходящуюся на каждые 0,01 единиц NDVI (317,3–321,7 м²/га), при достаточно высоких его значениях (0,83–0,84) – сорта Новоершовская и Фотинья. Следует также отметить достаточно специфические особенности короткостебельных сортов Гром и Донской сюрприз, сформировавших при

показателях ниже средних NDVI (0,78 единиц) и близкой к средней площади листовой поверхности (26,5 тыс. м²/га), превышающую средние значения площадь листовой поверхности на каждые 0,01 единиц NDVI.

Выводы

Агроценозы различных сортов озимой пшеницы, имеющие в целом схожую направленность динамики фитометрических параметров в течение вегетации, заметно различались по оптико-биологическим свойствам, выражающимся в величинах NDVI.

В близких к среднемноголетним значениям гидротермических условиях при ГТК равном 0,49 мм/°С наименьшими средними за вегетацию значениями NDVI (0,58–0,59) из группы безостых характеризовались сорта Дон 95, Быстрица, Спартак, а также Станичная и Синтетик из группы остистых сортов. Ещё меньшую (0,57) величину данного показателя наблюдали в посевах короткостебельного сорта Гром. Наибольшими значениями NDVI (0,67) характеризовались посевы безостых сортов Жемчужина Поволжья, Колос Оренбуржья и Оренбургская 105, а также Рифей и Пионерская 32 из группы остистых сортов. В целом между средними за вегетацию значениями NDVI группы остистых (0,62) и безостых (0,63) сортов весомой разницы не наблюдали.

Вариабельность между сортами по наименьшему (Гром, Дон 95) и наибольшему (Колос Оренбуржья, Пионерская 32, Оренбургская 105) значениям NDVI в период максимального развития ассимиляционного аппарата составила 0,17–0,19 единиц (фаза полного весеннего кущения). К фазе колошения, когда NDVI составлял 0,78–0,79 и 0,85–0,85–0,85 единиц соответственно, указанная разница несколько нивелировалась, но в целом осталась весомой, на уровне 0,08–0,11 единиц (10,9–14,9 %). Наибольшей площадью листовой поверхности (30 тыс. м²/га) характеризовались посевы сортов Саратовская 17, Колос Оренбуржья, Оренбургская 105, Рифей и Пионерская 32.

Прямой межсортовой зависимости между площадью листовой поверхности и NDVI озимой пшеницы не выявлено. В целом по группе исследуемых сортов межсортовая вариация NDVI детерминирует не более 40,0 % межсортовой вариации площади листовой поверхности ($R^2 = 0,38$). Различные сорта характеризовались индивидуальными значениями NDVI и площади листьев, выступающих индикаторами уровня развития и соответствия эталонным посевам.

Продолжение исследований предполагает выявление связей оптико-биологических свойств с урожайностью сортов, обладающих наибольшими адаптационными способностями и наивысшим урожайным ответом, адекватным современным климатическим и антропогенным изменениям. Перспективно построение сортовых графиков нарастания фитометрических параметров (по NDVI) в течение всей вегетации, соответствующих эталонным высокоурожайным посевам, и отработка технологических приёмов их оптимизации на основе интеллектуального «цифрового» земледелия.

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. Ramya K. T., Jan N., Ramya P., Singh P. K., Sing G. P., Arora A., Prabhu K. V. Genotypic variation for normalized difference vegetation index and its relationship with grain yield in wheat under terminal heat stress // Indian Journal of Genetics and Plant Breeding. 2015. Vol. 75. No. 2. P. 174–182. DOI:10.5958/0975-6906.2015.00027.9.

2. Буховец А.Г., Семин Е.А., Костенко Е.И., Яблоновская С.И. Моделирование динамики вегетационного индекса NDVI озимой пшеницы в условиях ЦФО // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2018. № 2(57). С. 186–199.
3. Lessio A., Fissore V., Borgogno-Mondino E. Preliminary tests and results concerning integration of Sentinel-2 and Landsat-8 OLI for crop monitoring // Journal of Imaging. 2017. Vol. 3. No. 4. P. 49. DOI:10.3390/jimaging3040049.
4. 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.
5. Ерошенко Ф. В., Сторчак И. Г., Шестакова Е. О. Площадь ассимиляционной поверхности и NDVI посевов озимой пшеницы // Земледелие. 2015. № 7. С. 37–39.
6. Cardia S., Remondino F., Dubbini M., De Gigio M., Gattelli M. Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images // Remote Sensing. 2015. Vol. 7. No. 4. P. 4026–4047. DOI:10.3390/rs70404026.
7. Гулянов Ю. А. Возможности интеллектуальных цифровых технологий в экологизации ландшафтно-адаптивного земледелия степной зоны // Известия Оренбургского ГАУ. 2019. № 4(78). С. 8–11.
8. Stupen M., Stupen N., Ryzhok Z., Stupen O. Application of satellite monitoring data for winter cereals growing in the Lviv Region // Geomatics and Environmental Engineering. 2020. Vol. 14. No. 4. P. 69–80. DOI: 10.7494/geom.2020.14.4.69.
9. Савин И. Ю., Танов Э. Р., Харзинов С. Использование вегетационного индекса NDVI для оценки качества пашни // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2015. Вып. 77. С. 51–65.
10. Ерошенко Ф. В., Сторчак И. Г., Чернова И. В. Оценка состояния посевов методами экспесс-диагностики // Аграрный вестник Урала. 2019. № 7 (186). С. 19–25. DOI: 10.32417/article_5d52af440f71b8.16701399.
11. Boori M. S., Choudhary K., Kupriyanov A. V. Crop growth monitoring through Sentinel and Landsat data based NDVI time-series // Computer optics. 2020. Vol. 44. No. 3. P. 409–419. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-635.
12. Плотников Д. Е., Ёлкина Е. С., Дунаева Е. А., Хвостиков С. А., Лупян Е. А., Барталёв С.А. Развитие метода автоматического распознавания озимых культур на основе спутниковых данных для оценки их состояния на территории Республики Крым // Таврический вестник аграрной науки. 2020. № 1(21). С. 64–82. DOI: 10.33952/2542-0720-2020-1-21-64-83.
13. Nichiporovich Z. A., Radevich E. A. Experience using the NDVI normalized difference vegetation index for monitoring Polesye agricultural land based on multispectral Ikonos satellite imaging data // Journal of Applied Spectroscopy. 2012. Vol. 79. No. 4. P. 670–673. DOI: 10.1007/s10812-012-9656-5.
14. Гулянов Ю. А., Досов Д. Ж. Особенности формирования площади листьев и фотосинтетического потенциала при различном сочетании приёмов удобрения озимой пшеницы на чернозёмах южных Оренбургского Предуралья // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2014. № 3(47). С. 26–29.
15. Подлесных Н. В. Фотосинтетическая деятельность посевов разных видов озимой пшеницы в условиях лесостепи Центрального Черноземья // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2016. № 2 (49). С. 19–29. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2016.2.19.
16. Ионова Е. В., Газе В. Л., Лиховидова В. А. Фотосинтетическая деятельность и динамика накопления сухой массы растений озимой мягкой пшеницы в зависимости от условий выращивания // Зерновое хозяйство России. 2020. № 1(67). С. 23–27. DOI: 10.31367/2079-8725-2020-67-1-23-27.
17. Гулянов Ю. А., Чибилёв А. А., Чибилёв А. А. (мл). Резервы повышения урожайности и качества зерна озимой пшеницы и их зависимость от гетерогенности посевов в условиях степной зоны Оренбургского Предуралья // Юг России: экология, развитие. 2020. Т. 15. № 1. С. 79–88. DOI: 10.18470/1992-1098-2020-1-79-88.
18. Брыксин В. М., Евтюшкин А. В., Рычкова Н. В. Прогнозирование урожайности зерновых культур на основе данных дистанционного зондирования и моделирования биопродуктивности // Известия Алтайского государственного университета. 2010. № 1-2. С. 89–93.
19. Терехин Э. А. Оценка сезонных значений вегетационного индекса (NDVI) для детектирования и анализа состояния посевов сельскохозяйственных культур // Исследование земли из космоса. 2015. № 1. С. 23–31. DOI: 10.7868/S0205961415010108.
20. Gulyanov Yu. A., Chibilev A. A., Levykin S. V., Silantieva M. M., Kazachkov G. V., Sokolova L. V. Ecological-based adaptation of agriculture to the soil and climatic conditions in Russian steppe // Ukrainian Journal of Ecology. 2019. Vol. 9(3). P. 393–398.
21. Gulyanov Yu. A., Chibilyov A. A., Levykin S. V., Yakovlev I. G. Modern climatic resources of the farming post-virgin land regions in Ural and West Siberia and their agricultural assessment // IOP Conf. Series “Earth and Environmental Science”. 2021. No. 624. P. 012226. DOI:10.1088/1755-1315/624/1/012226.

References

1. Ramya K.T., Jan N., Ramya P., Singh P.K., Sing G.P., Arora A., Prabhu K.V. Genotypic variation for normalized difference vegetation index and its relationship with grain yield in wheat under terminal heat stress // *Indian Journal of Genetics and Plant Breeding*. 2015. Vol. 75. No. 2. P. 174–182. DOI: 10.5958/0975-6906.2015.00027.9.
2. Bukhovets A. G., Semin E. A., Kostenko E. I., Iablonovskaia S. I. Simulation of the dynamic of the NDVI of winter wheat in the conditions of the Central Federal District // *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2018. No. 2(57). P. 186–199. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2018.2.186.
3. Lessio A., Fissore V., Borgogno-Mondino E. Preliminary tests and results concerning integration of Sentinel-2 and Landsat-8 OLI for crop monitoring // *Journal of Imaging*. 2017. Vol. 3. No. 4. P. 49. DOI: 10.3390/jimaging3040049.
4. Gulyanov Yu. A. Monitoring of the phytometric indications using innovative crops 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.
5. Eroshenko F. V., Storchak I. G., Shestakova E. O. Area of assimilative surface and NDVI of winter wheat crops // *Zemledelie*. 2015. No. 7. P. 37–39.
6. Cardiago S., Remondino F., Dubbini M., De Gigio M., Gattelli M. Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images // *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7. No. 4. P. 4026–4047. DOI:10.3390/rs70404026.
7. Gulyanov Yu. A. Opportunities of intelligent digital technologies in the ecologization of landscape-adaptive crop farming in the steppe zone // *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2019. No. 4(78). P. 8–11.
8. Stupen M., Stupen N., Ryzhok Z., Stupen O. Application of satellite monitoring data for winter cereals growing in the Lviv Region // *Geomatics and Environmental Engineering*. 2020. Vol. 14. No. 4. P. 69–80. DOI: 10.7494/geom.2020.14.4.69.
9. Savin I. Yu., Tanov E. R., Kharzinov S. The use of NDVI profiles for estimating the quality of arable lands (exemplified by the Baksan region in Kabardino-Balkaria) // *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2015. Vol. 77. P. 51–65.
10. Eroshenko F. V., Storchak I. G., Chernova I. V. Assessment of plant condition by express-diagnostic methods // *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2019. No. 7 (186). P. 19–25. DOI: 10.32417/article_5d52af440f71b8.16701399.
11. Boori M. S., Choudhary K., Kupriyanov A. V. Crop growth monitoring through Sentinel and Landsat data based NDVI time-series // *Computer Optics*. 2020. Vol. 44. No. 3. P. 409–419. DOI:10.18287/2412-6179-CO-635.
12. Plotnikov D. E., Elkina E. S., Dunaeva Ie. A., Khvostikov S. A., Loupian E. A., Bartalev S. A. Development of the method for automatic winter crops mapping by means of remote sensing aimed at crops state assessment over the Republic of Crimea // *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*. 2020. No. 1(21). P. 64–82. DOI: 10.33952/2542-0720-2020-1-21-64-83.
13. Nichiporovich Z. A., Radevich E. A. Experience using the NDVI normalized difference vegetation index for monitoring Polesye agricultural land based on multispectral Ikonos satellite imaging data // *Journal of Applied Spectroscopy*. 2012. Vol. 79. No. 4. P. 670–673. DOI: 10.1007/s10812-012-9656-5.
14. Gulyanov Yu. A., Dosov D. Zh. Peculiarities of leaf surface and the photosynthetic potential formation as result of using different methods of winter wheat fertilization on southern chernozems of Orenburg Preduralye // *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2014. No. 3 (47). P. 26–29.
15. Podlesnykh N. V. Photosynthetic activity of crops of different types of winter wheat under conditions of the forest steppe of the Central Chernozem Region // *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2016. No. 2 (49). P. 19–29. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2016.2.19.
16. Ionova E. V., Gaze V. L., Likhovidova V. F. Photosynthetic activity and dynamics of dry mass of plants accumulation of winter soft wheat, depending on growing conditions // *Grain Economy of Russia*. 2020. No. 1(67). P. 23–27. DOI: 10.31367/2079-8725-2020-67-1-23-27.
17. Gulyanov Yu. A., Chibilyov A.A., Chibilyov A.A. (Jr.). Reserves for the increase of yield and quality of winter wheat grain and their dependence on the heterogeneity of crops in the conditions of the steppe zone of the Orenburg Urals, Russia // *South of Russia: ecology, development*. 2020. Vol. 15. No. 1. P. 79–88. DOI: 10.18470/1992-1098-2020-1-79-88.
18. Bryksin V. M., Yevtyushkin A. V., Rychkova N. V. Forecasting of grain crops productivity on basis of the remote sounding data and bio-productivity modeling // *Izvestiya of Altai State University*. 2010. No. 1-2. P. 89–93.
19. Terekhin E. A. Estimation of seasonal NDVI values for the detection and analysis of crop conditions // *Issledovanie Zemli Iz Kosmosa*. 2015. No. 1. P. 23–31. DOI: DOI: 10.7868/S0205961415010108.

20. Gulyanov Yu. A., Chibilev A. A., Levykin S. V., Silantieva M. M., Kazachkov G. V., Sokolova L.V. Ecological-based adaptation of agriculture to the soil and climatic conditions in Russian steppe // Ukrainian Journal of Ecology. 2019. Vol. 9(3). P. 393–398.

21. Gulyanov Yu. A., Chibilyov A. A., Levykin S. V., Yakovlev I.G. Modern climatic resources of the farming post-virgin land regions in Ural and West Siberia and their agricultural assessment // IOP Conf. Series “Earth and Environmental Science”. 2021. No. 624. P. 012226. DOI:10.1088/1755-1315/624/1/012226.

UDC 631/635:632.08:633.1

Gulyanov Yu. A., Nikolaev N. A., Yakovlev I. G.

VARIETAL SPECIFICITY OF OPTO-BIOLOGICAL PROPERTIES AND PHYTOMETRIC PARAMETERS OF WINTER WHEAT CROPS

Summary. Identification of varietal specificity of opto-biological properties of field crops is necessary for adequate interpretation of satellite images, rapid determination of phytometric parameters of crops, indication of the level of their development and justification of corrective technological solutions. The aim of the research was to evaluate the opto-biological properties and phytometric parameters of diverse biological varieties of winter wheat; identify their relationship and inter-variety variability in high-tech reference crops based on satellite and ground monitoring. Field studies were conducted in 2019-2020 on the site of competitive ecological variety testing laid on the experimental field of the Orenburg State Agrarian University in the zone of the southern steppes of the Orenburg Cis-Urals (Preduralye). During the study, we found that agrocenoses of different winter wheat varieties differ markedly in opto-biological properties expressed in normalized difference vegetation index (NDVI) values. Varieties ‘Grom’, ‘Don 95’, ‘Bystritsa’, ‘Spartak’, ‘Stanichnaya’ and ‘Sintetik’ were characterized by the lowest average NDVI values during the growing season (0.57-0.59). Higher NDVI values (0.67) were observed in the crops of ‘Zhemchuzhina Povolzhya’, ‘Kolos Orenburzhya’, ‘Orenburgskaya 105’, ‘Rifey’ and ‘Pionerskaya 32’ varieties. The variability between the varieties according to the lowest (0.51 – ‘Grom’, 0.52 – ‘Don 95’) and the highest (0.69 – ‘Kolos Orenburzhya’, 0.70 – ‘Pionerskaya 32’, 0.69 – ‘Orenburgskaya 105’) NDVI values during the maximum assimilation apparatus development reached 0.17-0.19 units (phase of full spring tillering). By the heading, when NDVI was 0.78–0.79 and 0.85 units, respectively, this difference somewhat leveled but, in general, remained significant – at the level of 0.08-0.11 units (10.9–14.9 %). The largest leaf area (30 thousand m²/ha) was typical for the crops of ‘Saratovskaya 17’, ‘Kolos Orenburzhya’, ‘Orenburgskaya 105’, ‘Rifey’ and ‘Pionerskaya 32’. There was no direct inter-variety relationship between the leaf area and NDVI of winter wheat crops ($R^2 = 0.38$).

Keywords: agrocenoses, opto-biological properties, phytometric parameters, space monitoring, steppe zone, winter wheat *Triticum aestivum* 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.

Николаев Николай Александрович, старший научный сотрудник управления по организации научных исследований и подготовке научных кадров, ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет»; 460000, г. Оренбург, ул. Челюскинцев, 18; e-mail: Shahov-V@yandex.ru.

Яковлев Илья Геннадьевич, кандидат географических наук, научный сотрудник отдела степеведения и природопользования, Институт степи Уральского отделения Российской академии наук (ИС УрО РАН) – обособленное структурное подразделение Федерального государственного

бюджетного учреждения науки Оренбургского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (ОФИЦ РАН), 460000, Россия, г. Оренбург, ул. Пионерская, 11; e-mail: russo-turisto01@mail.ru.

Gulyanov Yuriy Aleksandrovich, Dr. Sc. (Agr.), professor, leading 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.

Nikolaev Nikolay Aleksandrovich, senior researcher, Department for the organization of scientific research and training of scientific personnel, FSBEI of HE “Orenburg State Agrarian University”; 18, Chelyuskintsev str., Orenburg, 18460000, Russia; e-mail: Shahov-V@yandex.ru.

Yakovlev Ilya Gennad'evich, Cand. Sc. (Geogr.), 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: russo-turisto01@mail.ru.

Дата поступления в редакцию – 28.04.2021.

Дата принятия к печати – 15.05.2021.