УДК 528.81:633.11:632.4 Вестник СПбГУ. Сер. 3. 2015. Вып. 2

Л. Е. Колесников, В. Г. Сурин, М. В. Киселев, Ю. Р. Колесникова

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРИ ОЦЕНКЕ АДАПТИВНОГО ПОТЕНЦИАЛА МЯГКОЙ ПШЕНИЦЫ К УСЛОВИЯМ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО РЕГИОНА РФ

В работе приведены данные по отражательной способности сортов и линий яровой мягкой пшеницы, обладающих различным уровнем продуктивности и устойчивости к возбудителю мучнистой росы. Инструментом для проведения работ послужил активный двухканальный оптический тестер АДТ-М. В качестве интегрального индикатора состояния растений был использован стресс-индекс (обратный вегетационный индекс), который характеризует степень угнетения растения. Увеличение значений стресс-индекса обусловливало снижение продуктивности пшеницы (массы 1000 зерен, потенциальной урожайности, площади флаг-листа), снижение содержания в зернах азота, фосфора, калия и усиление интенсивности поражения мягкой пшеницы возбудителем мучнистой росы. Для использования результатов в практике точного земледелия и защиты растений построены полиномиальные и экспоненциальные регрессионные модели, а также шкалы учета, отражающие указанные взаимосвязи. Библиогр. 20 назв. Ил. 5. Табл. 2.

Ключевые слова: яровая мягкая пшеница, продуктивность, мучнистая роса, активные оптические тестеры, точное земледелие, стресс-индекс, математические модели.

L. E. Kolesnikov[1], V. G. Surin[2], M. V. Kiselev[3], Yu. R. Kolesnikova[4]

APPLICATION OF THE SPECTROMETRIC ANALYSIS FOR THE ESTIMATION OF SOFT WHEAT ADAPTIVE POTENTIAL TO CONDITIONS OF THE NORTHWEST REGION OF THE RUSSIAN FEDERATION

[1] St. Peresburg State University, 7/9, Univesitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation; kleon9@yandex.ru

[2] Small innovation enterprise of Research Center for Interdisciplinary Environmental Cooperation of Russian Academy of Sciences (Mip-inenco RAS), 14, Kutuzova nab., St. Petersburg, 191187, Russian Federation; vsurin.40@mail.ru

[3] St. Petersburg State Agrarian University, 2, Peterburgskoe shosse, St. Petersburg, Pushkin, Russian Federation; kiselev_maksim@list.ru

[4] N. I. Vavilov Research Institute of Plant Industry, 42–44, B. Morskaya ul., St. Petersburg, 190000, Russian Federation; kleon9@yandex.ru

In the work the data according to reflectivity of spring soft wheat grades and lines, possessing various level of yield and resistance to the wheat powdery mildew agent is presented. The tool for the work was the active two-channel optical tester ADT-M. As the integrated plants condition indicator, the stress index (reverse vegetative index), which characterizes the degree of plant suppression, was used. The increase in a stress index values caused decrease in wheat yield (weight of 1000 grains, crop capacity, the flag leaf area), decrease in grains content of nitrogen, phosphorus, potassium and increased presence of powdery mildew agent. For use of the results in farming practice and plants protection a polynomial and exponential regression models, and also accounting scores, representing mentioned interrelations, were constructed. Refs 20. Figs 5. Tables 2.

Keywords: spring soft wheat, yield, powdery mildew, active optical testers, farming, stress index, mathematical models.

Л. Е. Колесников (kleon9@yandex.ru): Санкт-Петербургский государственный университет; Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9; В. Г. Сурин (vsurin.40@mail.ru): МИП ИНЭНКО РАН, Российская Федерация, 191187, Санкт-Петербург, наб. Кутузова, 14; М. В. Киселев (kiselev_maksim@list.ru): Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Российская Федерация, 196601, Санкт-Петербург, г. Пушкин, Петербургское шоссе, 2; Ю. Р. Колесникова (kleon9@yandex.ru): ВНИИ растениеводства им. Н. И. Вавилова, Российская Федерация, Санкт-Петербург, 190000, ул. Б. Морская, 42–44.

Введение

Спектрометрические измерения природных объектов в натурных условиях являются одним из современных методов исследования, которые применяются в рамках точного земледелия, а также широко используются в экологии, геологии, сельском хозяйстве и других областях. Их применение в комплексе с дистанционными исследованиями позволяет более эффективно решать задачи идентификации, классификации и диагностики состояния растительного покрова.

В практике сельского хозяйства с помощью спектрометрических измерений решаются следующие задачи: раннее обнаружение и интерпретация стрессов растений при отсутствии четких визуальных признаков угнетения; построение интегральных фотометрических шкал для оценки состояния растений при разных уровнях минерального питания и различной интенсивности поражения болезнями; определение пороговых нагрузок на агроэкосистемы, обусловленных передозировкой удобрений, применением современных средств химизации и прочими воздействиями, осуществляемыми в процессе хозяйственной деятельности [1–4].

Использование методов спектрометрических измерений в точном земледелии позволяет улучшить планирование, снизить негативные воздействия сельскохозяйственных мероприятий на окружающую среду при минимальных материальных затратах [5–7].

В хозяйствах с неблагоприятным фитосанитарным состоянием посевов яровой пшеницы практически невозможно реализовать в полной мере достижения селекции, семеноводства и прогрессивных технологий [8]. Особую опасность для основных зерносеющих регионов РФ представляет возбудитель мучнистой росы пшеницы *Blumeria graminis (*DC) Speer. (=*Erysipe graminis* DC.). В годы эпифитотий потери урожая пшеницы от мучнистой росы могут достигать 50% и более [9].

Вредоносность мучнистой росы проявляется в уменьшении ассимиляционной поверхности листьев. У пораженных растений подавляется развитие корней, ослабляется склеренхима стеблей, что вызывает склонность к полеганию. Болезнь приводит к преждевременному усыханию листьев и побегов кущения, уменьшению озерненности колосьев и плохому наливу зерна. В зерне уменьшается содержание сырой клейковины, белка и крахмала [10].

Для создания новых технологий, способствующих решению задач природопользования и защиты растений с использованием оптических методов, необходимы данные по оптическим характеристикам (отражательной и излучательной способности) различных биологических объектов. Оптические спектры являются их своеобразными «оптическими портретами», которые характеризуют изменение состояния жизнедеятельности, в том числе под влиянием разнообразных факторов среды.

Специфичность кривых спектральной отражательной способности растительности, позволяющая с достаточной точностью распознавать сельскохозяйственные культуры вплоть до отдельного вида, зависит от типа патогенеза как реакции растений на внедрение и развитие возбудителей болезней. Для растительных объектов характерна низкая отражательная способность в синей и красной областях спектра, некоторое увеличение ее в зеленой области, и резко выраженный максимум в ближнем инфракрасном диапазоне [11, 12].

В связи с этим цель настоящей работы — изучить спектрометрическим методом адаптивный потенциал яровой мягкой пшеницы различного происхождения в условиях Северо-Западного региона РФ.

Материалы и методы

Растительным материалом исследования послужили 25 сортов яровой мягкой пшеницы различного происхождения, предоставленные для исследования отделом генетических ресурсов пшениц ВИРа.

• Россия, Европейская часть (Эстер, к-64544; МИС, к-64567; Московская 35, к-48762; Воронежская 6, к-57114; Крестьянка, к-60468; Башкирская 24, к-61195; Тулайковская 10, к-63714; Керба, к-64112; Амир, к-64253; Подмосковная 10, к-64552; Мильтурум 63, к-64566; Энгелина, к-64569).

• Россия, Азиатская часть (Линия 1639/з 12165, к-55161; Линия 2773/з 4963, к-55164; Омская 18, к-58220; Алтайская 50, к-59569; Тулунская 12, к-63361).

• Центральная/Западная Европа (Triso, к-64981; Thasos, к-63469).

• Северная Европа (к-52361, WW 15370, к-52367; Tilly, к-52785; WW 14069, к-52786; WW 16151, к-52790).

Место проведения исследования — опытное поле Пушкинских лабораторий ВИРа, кафедра защиты и карантина растения СПбГАУ. Опыты выполнены в агроэкологических условиях Ленинградской области на естественном инфекционном фоне.

Почвы опытного участка дерново-подзолистые, легкосуглинистые. Содержание гумуса в пахотном слое 3,5%. Реакция почвенного раствора слабокислая. В полевом опыте образцы пшеницы были высеяны 5–10 мая на делянках площадью 1,0 м^2 рядовым способом посева с междурядьями 15 см и расстоянием в ряду 1–2 см (300 зерен/м^2). Глубина заделки семян: 5–6 см. Данные мероприятия были проведены согласно общепринятым рекомендациям и методикам ВНИИР им. Н. И. Вавилова по проведению полевых экспериментов [13].

Исследования проводили в вегетационный период 2012 г. При изучении показателей структуры урожая яровой пшеницы анализировали результаты по массе 1000 зерен, площади флаг-листа, продуктивной и общей кустистости образцов.

Потенциальную урожайность яровой мягкой пшеницы $Y_{р.}$ (т/га) рассчитывали по продуктивной кустистости и числу растений, высеянных на 1 м^2: $Y_{р.} = M_к K_п P_п \cdot 10000$, где: $M_к$ — масса зерен колоса одного растения (т), $K_п$ — продуктивная кустистость образца, $P_п$ — плотность посева (число растений на 1 м^2). Изучение характеристик структуры урожая образцов мировой коллекции пшеницы проводили в соответствии с методическими указаниями из работы [13].

Содержание в зернах яровой мягкой пшеницы общего азота, фосфора (P_2O_5) определяли фотоэлектрометрическим методом (ГОСТ 10846-91, ГОСТ Р 51420-99), калия (K_2O) — методом пламенной фотометрии (ГОСТ 30504-97).

Интенсивность поражения пшеницы мучнистой росой рассчитывали по показателям: условная величина развития болезни [14], число и площадь пятен с налетом, тип реакции по шкале из работы [15].

В качестве инструмента для проведения работ использовали активный двухканальный (с искусственной подсветкой объекта исследования) оптический тестер АДТ. Прибор фиксировал значения коэффициентов отражения в красной

U_r (0,66 мкм) и инфракрасной U_{ir} (0,95 мкм) областях спектра, являющихся индикаторами процессов, происходящих в области поглощения хлорофиллом и состояния клеточных структур. По значениям U_{ir} можно судить о величине биомассы и наличии воды в растениях [16]. В красном диапазоне спектра растительность характеризуется наименьшей степенью отражения, а в ближнем ИК-диапазоне спектра — наибольшей по сравнению с другими природными объектами. Для растительности в хорошем состоянии характерно падение спектральной кривой в красном диапазоне и резкий подъем в ближнем ИК-диапазоне [16].

В качестве интегрального индикатора состояния растений был использован стресс-индекс (обратный вегетационный индекс): $F = U_r / U_{ir}$, который численно характеризует степень угнетения растения. Минимальная величина F соответствует наилучшему состоянию растения, при котором, как правило, в растении отмечается больше хлорофилла и наибольшая биомасса. С ростом F эти показатели, как правило, снижаются.

При проведении компьютерной обработки данных использовали методы описательной статистики, корреляционного и регрессионного анализов, реализованные в пакетах прикладных программ SPSS 18.0, Statistica 6.0.

Результаты

Данные определения массы 1000 зерен, потенциальной урожайности, площади флаг-листа и стресс-индекса (F) сортов яровой мягкой пшеницы различного происхождения отражены на рис. 1–4. Максимальной массой 1000 зерен M_{1000} и потенциальной урожайностью $Y_з$ отличались образцы из Центральной / Западной Европы ($M_{1000} = 37{,}51 \pm 0{,}06$ г, 95%-ный доверительный интервал: $d = 37{,}38 \pm 37{,}64$ г, $Y_з = 3{,}44 \pm 0{,}23$ т/га, $d = 2{,}97–3{,}91$ т/га). Данная группа образцов характеризовалась

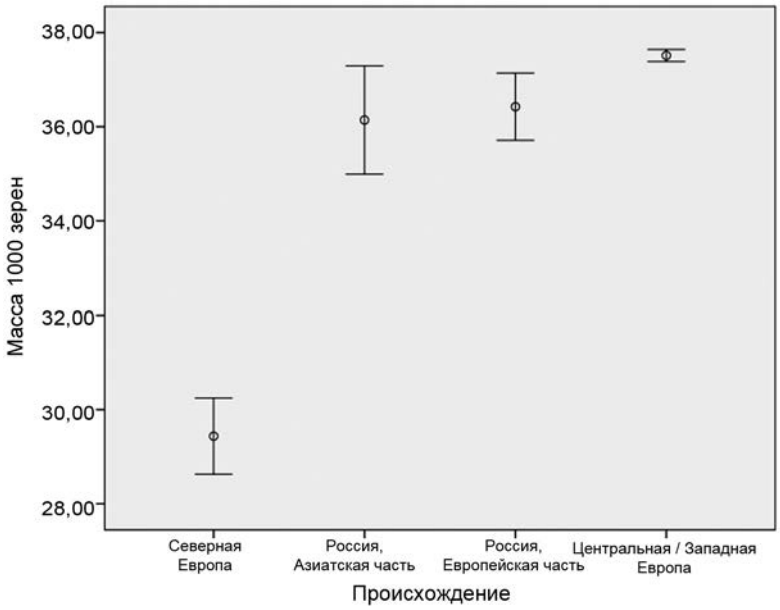

Рис. 1. Изменение массы 1000 зерен яровой мягкой пшеницы различного происхождения. 2012 г.

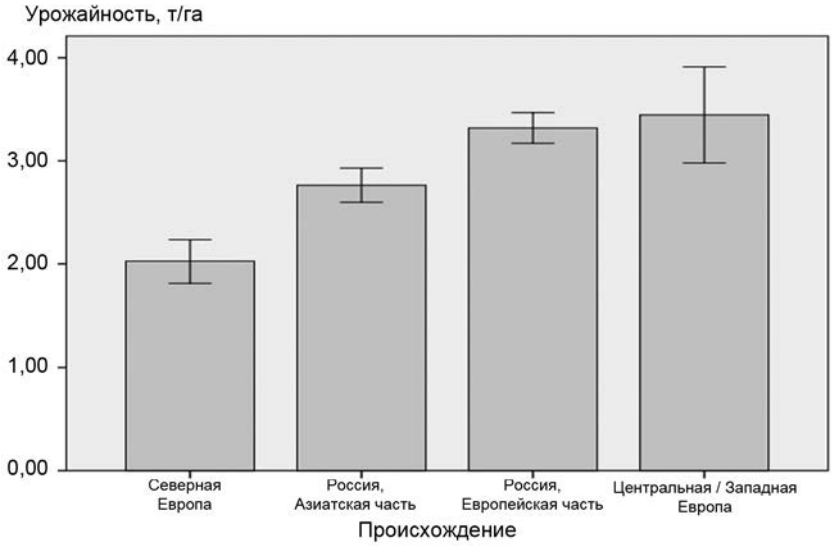

*Рис. 2 И*зменение потенциальной урожайности яровой мягкой пшеницы различного происхождения. 2012 г.

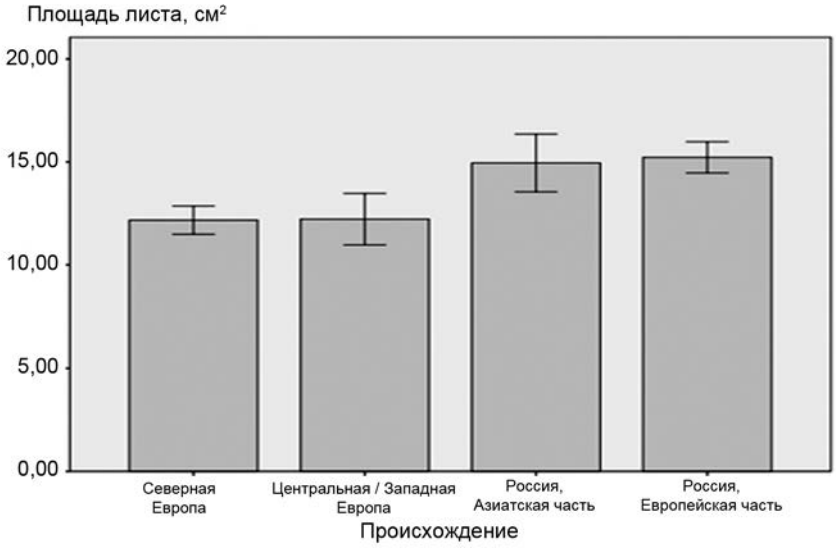

Рис. 3. Изменение площади флаг-листа яровой мягкой пшеницы различного происхождения. 2012 г.

площадью флаг-листа: $S_{л.} = 12{,}21 \pm 0{,}60$ см^2, $d = 10{,}96 \pm 13{,}47$ см^2) и минимальными значением стресс-индекса ($F = 0{,}21 \pm 0{,}02$), т. е. обладала наибольшим адаптивным потенциалом к факторам внешней среды.

Сорта из европейской и азиатской частей РФ существенно не различались по показателю массы 1000 зерен ($M_{1000} = 36{,}42 \pm 0{,}36$ г, $d = 35{,}70–37{,}13$ г и $M_{1000} = 36{,}14 \pm 0{,}36$ г, $d = 34{,}98–37{,}29$ г) и площади флаг-листа ($S_{л.} = 15{,}22 \pm 0{,}38$ см^2, $d = 14{,}47 \pm 15{,}97$ см^2

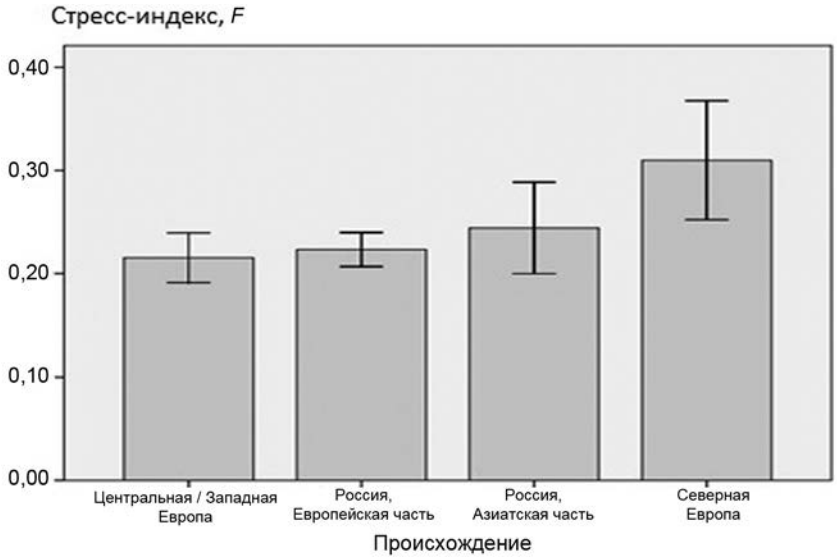

Рис. 4. Изменение стресс-индекса яровой мягкой пшеницы различного происхождения. 2012 г.

и $S_{л.} = 14{,}95 \pm 0{,}70$ см^2, $d = 13{,}54 \pm 16{,}35$ см^2). Однако по потенциальной урожайности сорта из европейской части России характеризовались большими значениями показателя ($Y_з = 3{,}31 \pm 0{,}08$ т/га, $d = 3{,}17–3{,}47$ т/га) по сравнению с сортами из азиатской части ($Y_з = 2{,}76 \pm 0{,}08$ т/га, $d = 2{,}59–2{,}92$ т/га). Стресс-индекс сортов из европейской и азиатской частей России характеризовался значениями: $F = 0{,}22 \pm 0{,}02$ и $F = 0{,}24 \pm 0{,}04$ соответственно.

Существенно меньшими значениями вышеуказанных показателей отличались образцы из Северной Европы ($M_{1000} = 29{,}43 \pm 0{,}40$ г, $d = 28{,}62–30{,}24$ г, $Y_з = 2{,}02 \pm 0{,}10$ т/га, $d = 1{,}81–2{,}23$ т/га, $S_{л.} = 12{,}17 \pm 0{,}34$ см^2, $d = 11{,}48–12{,}86$ см^2), которые характеризовались наибольшими значениями индекса $F = 0{,}31 \pm 0{,}06$; таким образом, данная группа обладала максимальными стрессовыми реакциями к факторам среды.

В результате сравнения полученных данных по массе 1000 зерен, площади флаг-листа и потенциальной урожайности со значениями F между показателями выявлены следующие зависимости. Образцы пшеницы с массой 1000 зерен: $M_{1000} = 37{,}32 \pm 1{,}06$ г, $d = 35{,}23–39{,}42$ г характеризовались величиной стресс-индекса $F = 0{,}17 \pm 0{,}01$, $d = 0{,}15–0{,}20$. Образцы пшеницы с $M_{1000} = 29{,}85 \pm 1{,}34$ г, $d = 27{,}20–32{,}49$ г отличались величиной $F = 0{,}32 \pm 0{,}04$, $d = 0{,}25–0{,}40$.

Зависимость снижения массы 1000 зерен яровой мягкой пшеницы с возрастанием значений стресс-индекса можно представить в виде уравнения линейной регрессии $M_{1000} = 38{,}68–16{,}29F$, $r^2 = 0{,}42$. Снижение площади флаг-листа с ростом F может быть описано выражением $S_л = 15{,}89–10{,}69F$, $r^2 = 0{,}67$ на рис. 5. Экспериментально установлено, что образцы пшеницы с площадью флаг-листа: $S_{л.} = 14{,}19 \pm 0{,}39$ см^2, $d = 13{,}42 – 14{,}96$ см^2 характеризовались величиной стресс-индекса $F = 0{,}17 \pm 0{,}01$, $d = 0{,}15–0{,}20$. Образцы пшеницы с $S_{л.} = 12{,}52 \pm 0{,}84$ см^2, $d = 10{,}88–14{,}17$ см^2 отличались $F = 0{,}33 \pm 0{,}04$, $d = 0{,}24–0{,}42$.

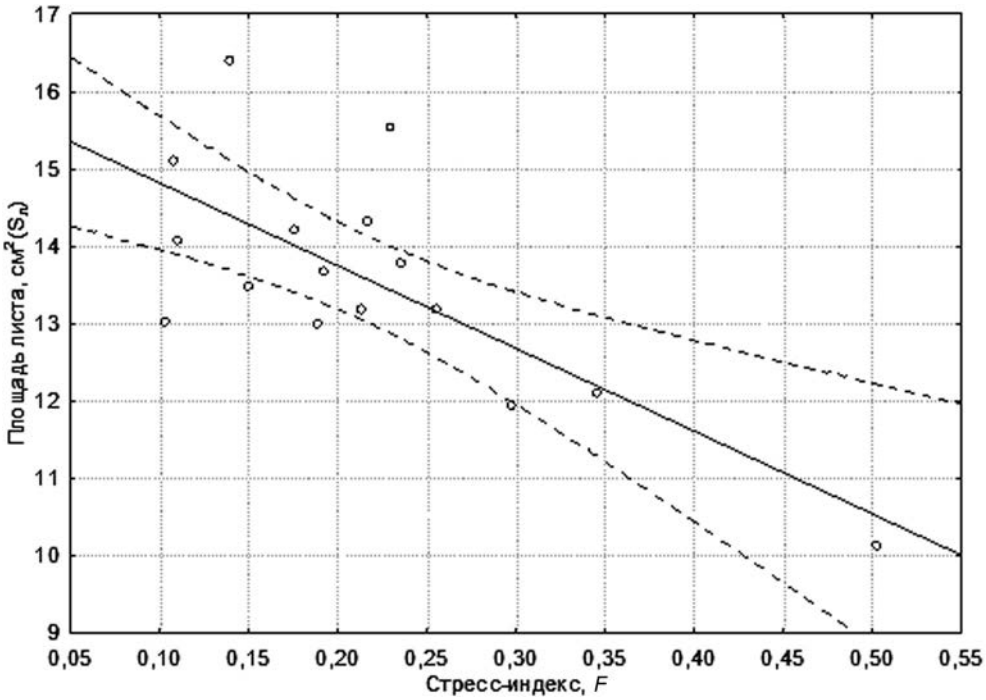

Рис. 5. Зависимость снижения площади флаг-листа яровой мягкой пшеницы от величины стресс-индекса. 2012 г.

Образцы пшеницы с потенциальной урожайностью $Y_з = 3{,}08 \pm 0{,}10$ т/га, $d = 2{,}88$–$3{,}28$ т/га характеризовались величиной стресс-индекса $F = 0{,}18 \pm 0{,}01$, $d = 0{,}15$–$0{,}20$. Образцы пшеницы с $Y_з = 2{,}13 \pm 0{,}33$ т/га, $d = 1{,}48$–$2{,}79$ т/га отличались величиной $F = 0{,}33 \pm 0{,}04$, $d = 0{,}24$–$0{,}42$. Снижение потенциальной урожайности пшеницы с ростом стресс-индекса может быть описано выражением $Y_з = 2{,}16 + \mathrm{EXP}(1{,}89 - 19{,}47F)$, $r^2 = 0{,}52$.

Таким образом, снижение стресс-индекса на 46,37% (с 0,32 до 0,17) определяло возрастание массы 1000 зерен на 20,02% (с 29,85 до 37,32 г), площади флаг-листа — на 11,77% (с 12,52 до 14,19 см^2), потенциальной урожайности — на 30,84% (с 2,13 до 3,08 т/га).

По сравнению с группой образцов, характеризующихся высоким содержанием в зернах азота, фосфора и калия (N = 22,9 ± 0,1 мг/г, P = 2,47 мг/г, K = 25,95 ± 0,14 мг/г) и минимальными значениями стресс-индекса: $F = 0{,}10$–$0{,}15$, у остальных сортов (с более низким содержанием макроэлементов в зернах) выявлены большие значения стресс-индекса F. Изменение содержания в зернах азота (N), фосфора (P) и калия (K) в зависимости от значений F может быть описано регрессионными уравнениями экспоненциального роста: $\mathrm{N} = -17{,}37 + \mathrm{EXP}(3{,}73 - 0{,}24F)$, $r^2 = 0{,}72$; $\mathrm{P} = 2{,}16 + \mathrm{EXP}(-0{,}45 - 6{,}30F)$, $r^2 = 0{,}67$; $\mathrm{K} = 11{,}21 + \mathrm{EXP}(2{,}74 - 0{,}36F)$, $r^2 = 0{,}65$. Многофакторную регрессионную модель изменения стресс-индекса F в зависимости от содержания в зернах азота, фосфора и калия можно представить в виде уравнения множественной регрессии $F = 0{,}30 - 0{,}0004\mathrm{N}^2 - 0{,}04\mathrm{P}^2 + 0{,}0005\mathrm{K}^2$, $r^2 = 0{,}38$. Из выражения следует,

что основным лимитирующим агрохимическим параметром в условиях проведения эксперимента является фосфор.

Выявлена тенденция возрастания F с усилением степени поражения сортов яровой мягкой пшеницы возбудителем мучнистой росы. Экспериментально определено, что при отсутствии симптомов развития болезни ($R_м = 0\%$) стресс-индекс составил: $F = 0{,}13 \pm 0{,}02$. При развитии болезни на образцах пшеницы от 1 до 25% выявлена тенденция роста значений стресс-индекса $R_м = 1 \pm 0\%$ — $F = 0{,}21 \pm 0{,}02$; $R_м = 3{,}8 \pm 1{,}0\%$ — $F = 0{,}22 \pm 0{,}04$; $R_м = 12{,}4 \pm 1{,}7\%$ — $F = 0{,}22 \pm 0{,}02$; $R_м = 24{,}6 \pm 1{,}7\%$ — $F = 0{,}26 \pm 0{,}03$. При развитии болезни $R_м = 45{,}6 \pm 7{,}3\%$ стресс-индекс снижался и составлял $F = 0{,}15 \pm 0{,}01$, что может быть связано с искажениями оптического сигнала из-за влияния «мучнистого налета», заполняющего около половины площади листа. Возможно, при этом имеют место и нарушения метаболизма, связанные с разрушением клеточных структур растений и потерей клетками воды.

Изменения интенсивности развития болезни в зависимости от величины стресс-индекса можно представить в виде уравнения кубической регрессии $R_м = -17{,}799 + 88{,}5399F + 88{,}5399F^2 + 88{,}5399F^3$, $r^2 = 0{,}37$. Зависимость изменения числа пятен болезни от величины обратного стресс-индекса можно представить в виде уравнения регрессии третьей степени $N_{п.м.} = -9{,}5058 + 57{,}3331F + 57{,}3331F^2 + 57{,}3331F^3$, $r^2 = 0{,}48$.

Выявлены положительные корреляционные связи (при $p < 0{,}05$) между содержанием в зернах яровой мягкой пшеницы азота (N), фосфора (P), калия (K) и интенсивностью поражения сортов возбудителем мучнистой росы (развитием болезни (%): $r_N = 0{,}45$, $r_P = 0{,}48$, $r_к = 0{,}42$; числом пятен с налетом (%): $r_N = 0{,}49$, $r_P = 0{,}53$, $r_к = 0{,}48$; площадью пятен с налетом: $r_N = 0{,}57$, $r_P = 0{,}61$, $r_к = 0{,}38$). На показатель «тип реакции» содержание указанных макроэлементов в зерне существенного влияния не оказывало.

По результатам работы построена фотометрическая шкала для оценки биометрических и биохимических показателей посевов сортов пшеницы по стресс-индексу (табл. 1). При построении шкалы градаций были учтены результаты анализа регрессионных зависимостей между комплексом показателей урожайности пшеницы, качества зерна и степени поражения возбудителем мучнистой росы, а также использованы имеющиеся в литературе общепринятые приемы для оценки состояния посевов зерновых культур [17, 18].

Таблица 1. **Состояние посевов пшеницы по биометрическим и биохимическим показателям при разных значениях стресс-индекса *F*. 2012 г.**

Стресс-индекс (F)	M_{1000}, г	$S_л$, см^2	$Y_з$, т/га	N, мг/г	P, мг/г	K, мг/г	$R_м$, %	$N_{п.м.}$	Состояние посевов	
									Балл	Градация состояния
0,1	37,1	14,6	3,1	23,3	2,5	26,1	1,0	1,0	5	Хорошее
0,2	35,4	13,5	2,3	22,4	2,3	25,6	4,2	4,7	4	
0,3	33,8	12,5	2,2	21,4	2,3	25,1	19,1	14,4	3	Удовлетворительное
0,4	32,2	11,6	2,2	20,5	2,2	24,6	37,4	26,3	2	
0,5	30,5	10,8	2,2	19,6	2,2	24,1	59,7	40,7	1	Плохое

Выявлена тенденция ухудшения состояния посевов пшеницы по основным показателям структуры урожайности, качества зерна (по содержанию азота, фосфора и калия), фитосанитарного состояния (по степени поражения пшеницы возбудителем мучнистой росы) с ростом значений *F*. В частности, по сравнению с посевами образцов, отнесенных к первому баллу, посевы пшеницы, оцененные на пять баллов, отличались большими значениями: массы 1000 зерен (M_{1000}) на 57,68%, площади флагового листа ($S_л$) — на 35,19%, потенциальной урожайности — на 40,91%, содержания в зерне азота, фосфора и калия (N — на 18,88%, P — на 13,63% , K — на 8,30% соответственно), отсутствием симптомов поражения возбудителем мучнистой росы.

В табл. 2 приведены значения вариабельности измерений оптических, биометрических и биохимических показателей образцов в пределах всего диапазона изменения стресс-индекса *F*, на начальной и конечной стадиях стресса. Такая вариабельность являлась оценкой чувствительности показателя (при близких значениях погрешности его определения в пределах измерительной шкалы) и в линейном приближении определялась через отношение его максимального и минимального значений (max/min) как для всего диапазона изменения стресс-индекса от 0,1 до 0,5 (переход 5→1), так и отдельно для низкого — (переход (5→4) и высокого — (переход 2→1) уровней стресса.

Таблица 2. **Сравнительный анализ определения чувствительности оптических, биометрических и биохимических показателей образцов при разных изменениях стрессовых состояний посевов пшеницы. 2012 г.**

Изменение состояния посевов по баллам	Оптическая чувствительность стресс-индекса *F*	Чувствительность биометрических и агрохимических показателей							
		M_{1000}, г	$S_л$, см^2	$Y_з$, т/га	N, мг/г	P, мг/г	K, мг/г	$R_м$, %	$N_{п.м.}$
5→1	5	1,2	1,4	1,4	1,2	1,1	1,1	59,7	40,7
2→1	2	1,0	1,1	1,3	1,0	1,1	1,0	4,2	4,7
5→4	1,25	1,25	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,6

При изменении *F*, как в широких пределах от 0,1 до 0,5, так и на начальной стадии стресса 0,1–0,2 наиболее высокие значения изменчивости имеют показатели, связанные с поражением растений возбудителем мучнистой росы ($R_м$, % и $N_{п.м.}$). Низкие значения вариабельности выявлены у биометрических (M_{1000}, $S_л$ и $Y_з$) и биохимических показателей (N, P, K). Чувствительность по стресс-индексу занимает промежуточное положение.

Необходимо отметить, что применение спектрометрических методов в целях решения задач АПК в настоящее время достаточно востребованно. Так, спектрометрическая аппаратура широко используется в спутниковых системах Terra, Spot и Landsat для дистанционного зондирования Земли и применяется, кроме прочего, для оценки урожайности сельскохозяйственных культур [18], при этом реализация измерительных процедур предполагает использование адекватных измерительных моделей [16]. Таким образом, методы, использованные в настоящей работе, применительно к конкретным условиям определенной климатической зоны, позволяют получить более точные сведения, отражающие состояние сельскохозяйственных

посевов, а полученные данные подтверждают и дополняют имеющиеся в литературе сведения [19, 20] об отражательной способности посевов зерновых культур с учетом влияния комплекса факторов. В то же время в отличие от ряда работ, посвященных спектрометрическим исследованиям сельскохозяйственных культур [11, 18, 19], нами сделан акцент на создание комбинированных «оптических портретов» сортов яровой пшеницы, где, помимо прочих общепринятых ботанических и анатомических характеристик, учитывается целый комплекс показателей состояния растений: их происхождение, урожайность, качество зерна, степень поражения возбудителем мучнистой росы и определяются взаимосвязи указанных показателей со стресс-индексом (обратный вегетационный индекс).

Представленные в работе данные позволяют сделать вывод о достаточно высокой информативности стресс-индекса при проведении интегральных оценок состояния исследованных сортов пшеницы различного происхождения и их адаптации к агроэкологическим условиям выращивания, в том числе при поражении возбудителем мучнистой росы. Использование предложенных измерительных спектрометрических процедур в практике точного земледелия и защиты растений как в форме построенных шкал учета, так и регрессионных моделей позволит дистанционно в полевых условиях оценить адаптивный потенциал сортов пшеницы по стрессовым реакциям растений.

Литература

1. *Сурин В. Г., Моисеев К. Г., Пищик В. Н.* Использование вегетационного индекса для калибровки оптических тестеров по азотному питанию растений в посеве // Материалы научной сессии по итогам 2011 г. Агрофизического института. СПб., 27–29 декабря 2011 г. СПб.: АФИ, 2012. С. 90–94.

2. *Броварец А. А.* Технологии мониторинга состояния сельскохозяйственных угодий // Аграрная наука XXI века: проблемы и перспективы. Материалы международной научно-практической конференции (18–19 апреля 2013 года). Великие Луки, 2013. С. 85–99.

3. *Ананьев И. П.* Состояние и перспективы разработки агрофизических средств инструментального контроля. Приборы, информационно-измерительные системы и информационное обеспечение сельскохозяйственных исследований и агротехнологий // Агрофизика. 2012. № 3(7). С. 65–74.

4. *Сурин В. Г., Колесников Л. Е., Кувалдин Э. В., Саблина Ю. Р.* Сравнительный фотометрический и биолокационный методы оценки состояния растений // Источники биоактивных излучений. Минералы. Электрические поля. Растения: сб. науч статей. М.: МНТО РЭС им. А. С. Попова, 2006. С. 48–54.

5. *Johnson G. V., Raum W. R.* Nitrogen response index as a guide to fertilizer Management // J. Plant Nutrition. 2003. Vol. 26, N 2. P. 249–262.

6. Applications and researches using remote sensing for rangeland management / Hant E. R., Everitt J. H., Ritchle J. C., Moran M. S., Booth D. T., Anderson G. L., Clark P. E., Seyfried M. S. // Photogrammetric Engeneering and Remote Sensing. 2003. Vol. 69. P. 675–693.

7. *Harfield J. L., Gitelson A. A., Schepers J. S., Walthall C. L.* Application of spectral remote sensing for Agronomic Decisions // Agron. J. 2008. Vol. 100. P. 117–131.

8. *Захаренко В. А., Захаренко А. В.* Экономический аспект применения пестицидов в современном земледелии России // Российский химический журнал (Журн. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева). 2005. Т. XLIX, № 3. С. 55–63.

9. *Веденеева М. Л., Маркелова Т. С., Кириллова Т. В., Аникеева Н. В.* Стратегия селекции болезнеустойчивых сортов пшеницы в Поволжье. 1. Бурая ржавчина, мучнистая роса, пыльная и твердая головня // Агро XXI. 2002. № 2. С. 12–13.

10. *Неклеса Н. П.* Мучнистая роса зерновых культур // Защита и карантин растений. 2002. № 4. С. 46–47.

11. *Бекмухамедов Н. Э., Карабкина Н. Н.* Изменение спектральных характеристик растений яровой пшеницы зараженных грибковыми болезнями // Сельское, лесное и водное хозяйство. 2013. № 10. URL: http://agro.snauka.ru/2013/10/1169 (дата обращения: 14.04.2015).

12. *Адамчук В. И.* Точное земледелие: Какой в этом смысл? // Питание растений. 2011. № 1. С. 2–5.

13. Пополнение, сохранение в живом виде и изучение мировой коллекции пшеницы, эгилопса и тритикале / Мережко А. Ф., Удачин Р. А., Зуев В. Е., Филотенко А. А., Сербин А. А., Ляпунова О. А., Косов В. Ю., Куркиев У. К., Охотникова Т. В., Наврузбеков Н. А., Богуславский Р. Л., Абдуллаева А. К., Чикида Н. Н., Митрофанова О. П., Потокина С. А. // Методические указания. СПб.: ВИР, 1999. С. 32–35.

14. *Гешеле Э. Э.* Основы фитопатологической оценки в селекции растений. М., 1978. 203 с.

15. *Mains E. B., Dietz S. M.* Physiologic forms of barley mildew Erysiphe graminis hordei Marchal // Phytopathology. 1930. Vol. 20, N 3. P. 220–239.

16. *Сурин В. Г.* Прикладная полевая спектроскопия. Средства и методы. Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 108 S.

17. Практическое руководство по контролю за состоянием посевов озимой пшеницы в Ставропольском крае / Жерновой В. А., Огарев В. Д., Яловой В. А., Асалиев А. И., Бобрышев Ф. И., Петрова Л. Н., Чернов А. Я., Прокудин Е. А., Титенок Л. Н., Подколзин А. И., Бурлай А. В., Шустикова Е. П., Подколзин О. А., Никитенко В. Г., Столяров В. Д., Абалдов А. Н., Морозов Н. А. / под ред. А. И. Подколзина. Ставрополь, 2000. 30 с.

18. *Сахарова Е. Ю., Сладких Л. А., Захватов М. Г.* Спутниковый мониторинг состояния посевов и прогнозирование урожайности зерновых культур на юге Западной Сибири // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2014. № 1, т. 4. С. 1–7.

19. *Брыксин В. М., Евтюшкин А. В.* Оценка урожайности зерновых культур на основе данных дистанционного зондирования и модели биопродуктивности // ГЕО-Сибирь–2005. Науч. конгр.: сб. матер. в 7 т. (Новосибирск, 25–29 апреля 2005 г.). Новосибирск: СГГА, 2005. Т. 5. С. 218–223.

20. *Антонов В. Н., Сладких Л. А.* Мониторинг состояния посевов и прогнозирование урожайности яровой пшеницы по данным ДЗЗ // ГЕОМАТИКА. 2009. № 4. С. 50–53.

References

1. Surin V. G., Moiseev K. G., Pishchik V. N. Ispol'zovanie vegetatsionnogo indeksa dlia kalibrovki opticheskikh testerov po azotnomu pitaniiu rastenii v poseve [Use of a vegetation index for optical testers' calibration according to the plants nitric nutrition in crops]. *Materialy nauchnoi sessii po itogam 2011 Agrofizicheskogo instituta. Sankt-Peterburg, 27–29 dekabria 2011 g.*[Materials of scientific session following the results of 2011 Agrophysical institute. St. Petersburg, December, 27–29th, 2011]. St. Petersburg, AFI Publ., 2012, pp. 90–94. (In Russian)

2. Brovarets A. A. Tekhnologii monitoringa sostoianiia sel'skokhoziaistvennykh ugodii [Technologies of agricultural grounds condition monitoring]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (18–19 aprelia 2013 goda) "Agrarnaia nauka XXI veka: problemy i perspektivy"* [Materials of the international scientifically-practical conference (April, 18–19th, 2013) "The Agrarian science of the 21-st century: problems and prospects"]. Velikie Luki, 2013, pp. 85–99. (In Russian)

3. Anan'ev I. P. Sostoianie i perspektivy razrabotki agrofizicheskikh sredstv instrumental'nogo kontrolia. Pribory, informatsionno-izmeritel'nye sistemy i informatsionnoe obespechenie sel'skokhoziaistvennykh issledovanii i agrotekhnologii [Condition and prospect of instrument inspection agrophysical means' engineering. Devices, information-measuring systems and information support of agricultural researches and agrotechnologies]. *Agrofizika* [Agrophysics], 2012, no. 3(7), pp. 65–74. (In Russian)

4. Surin V. G., Kolesnikov L. E., Kuvaldin E. V, Sablina Iu. R. Sravnitel'nyi fotometricheskii i biolokatsionnyi metody otsenki sostoianiia rastenii [Comparative photometric and biolocation methods of plants condition estimation]. *Sb. nauch statei «Istochniki bioaktivnykh izluchenii. Mineraly. Elektricheskie polia. Rasteniia»* [Coll. of Scientific articles "Bioactive emission sources. Minerals. Electric fields. Plants"]. Moscow, MNTO RES im. A. S. Popova, 2006, pp. 48–54. (In Russian)

5. Johnson G. V., Raum W. R. Nitrogen response index as a guide to fertilizer management. *J. Plant Nutrition*, 2003, vol. 26, no. 2, pp. 249–262.

6. Hant E. R., Everitt J. H., Ritchle J. C., Moran M. S., Booth D. T., Anderson G. L., Clark P. E., Seyfried M. S. Applications and researches using remote sensing for rangeland management. *Photogrammetric Engeneering and Remote Sensing*, 2003, vol. 69, pp. 675–693.

7. Harfield J. L., Gitelson A. A., Schepers J. S., Walthall C. L. Application of spectral remote sensing for Agronomic Decisions. *Agron. J.,* 2008, vol. 100, pp. 117–131.

8. Zakharenko V. A., Zakharenko A. V. Ekonomicheskii aspekt primeneniia pestitsidov v sovremennom zemledelii Rossii [The economic aspect of use of pesticides in modern agriculture of Russia]. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal (Zhurn. Ros. khim. ob-va im. D. I. Mendeleeva)* [The Russian chemical Journal (Russian Journal of General Chemistry)], 2005, vol. XLIX, no. 3, pp. 55–63. (In Russian)

9. Vedeneeva M. L., Markelova T. S., Kirillova T. V., Anikeeva N. V. Strategiia selektsii bolezneustoichivykh sortov pshenitsy v Povolzh'e. 1. Buraia rzhavchina, muchnistaia rosa, pyl'naia i tverdaia golovnia [Strategy of wheat disease-resistant cultivars selection in the Volga River region. 1. A brown rust, powdery mildew, loose smut and stinking smut]. *Agro XXI* [Agro XXI], 2002, no. 2, pp. 12–13. (In Russian)

10. Neklesa N. P. Muchnistaia rosa zernovykh kul'tur [The powdery mildew of cereal crops]. *Zashchita i karantin rastenii* [Plant protection and quarantine], 2002, no. 4, pp. 46–47. (In Russian)

11. Bekmukhamedov N. E., Karabkina N. N. Izmenenie spektral'nykh kharakteristik rastenii iarovoi pshenitsy zarazhennykh gribkovymi bolezniami [Change of spectral characteristics of spring wheat plants, infected by fungoid diseases]. *Sel'skoe, lesnoe i vodnoe khoziaistvo* [Agriculture, forestry and a water industry], 2013, no. 10. (In Russian) Available at: http://agro.snauka.ru/2013/10/1169 (accessed 14.04.2015).

12. Adamchuk V. I. Tochnoe zemledelie: Kakoi v etom smysl? [Precision agriculture: What is the good of it?]. *Pitanie rastenii* [Plant nutrition], 2011, no. 1, pp. 2–5. (In Russian)

13. Merezhko A. F., Udachin R. A., Zuev V. E., Filotenko A. A., Serbin A. A., Liapunova O. A., Kosov V. Iu., Kurkiev U. K., Okhotnikova T. V., Navruzbekov N. A., Boguslavskii R. L., Abdullaeva A. K., Chikida N. N., Mitrofanova O. P., Potokina S. A. Popolnenie, sokhranenie v zhivom vide i izuchenie mirovoi kollektsii pshenitsy, egilopsa i tritikale [Replenishment, preservation in a viable state and studying of a world collection of wheat, goat grass and triticale]. *Metodicheskie ukazaniia* [Methodical instructions]. St. Petersburg: VIR Publ., 1999, pp. 32–35. (In Russian)

14. Geshele E. E. *Osnovy fitopatologicheskoi otsenki v selektsii rastenii* [Basic foundation of a phytopathologic estimation in plant selection]. Moscow, 1978, 203 p. (In Russian)

15. Mains E. B., Dietz S. M. Physiologic forms of barley mildew Erysiphe graminis hordei Marchal. *Phytopathology*, 1930, vol. 20, no. 3, pp. 220–239.

16. Surin V. G. *Prikladnaia polevaia spektroskopiia. Sredstva i metody* [Applied field spectroscopy. Tools and methods]. Germany, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 108 p. (In Russian)

17. Zhernovoi V. A., Ogarev V. D., Ialovoi V. A., Asaliev A. I., Bobryshev F. I., Petrova L. N., Chernov A. Ia., Prokudin E. A., Titenok L. N., Podkolzin A. I., Burlai A. V., Shustikova E. P., Podkolzin O. A., Nikitenko V. G., Stoliarov V. D., Abaldov A. N., Morozov N. A. *Prakticheskoe rukovodstvo po kontroliu za sostoianiem posevov ozimoi pshenitsy v Stavropol'skom krae* [Practical manual for the winter wheat crops condition control in the Stavropol Territory]. Ed. by Podkolzin A. I. Stavropol, 2000, 30 p. (In Russian)

18. Sakharova E. Iu., Sladkikh L. A., Zakhvatov M. G. Sputnikovyi monitoring sostoianiia posevov i prognozirovanie urozhainosti zernovykh kul'tur na iuge Zapadnoi Sibiri [Satellite monitoring of a crops condition and forecasting of cereal crops yield in the south of the Western Siberia]. *Interekspo GEO-Sibir'*, no. 1, vol. 4, 2014, pp. 1–7. (In Russian)

19. Bryksin V. M., Evtiushkin A. V. Otsenka urozhainosti zernovykh kul'tur na osnove dannykh distantsionnogo zondirovaniia i modeli bioproduktivnosti [The cereal crops yield estimation on the basis of the remotely sensed data and biological productivity model]. *GEO-Sibir'–2005. Nauch. kongr.: sb. mater. v 7 t. (Novosibirsk, 25–29 aprelia 2005 g.)* [GEO-Siberia–2005. sci. congr.: coll. of materials in 7 v. (Novosibirsk, April, 25–29th, 2005)]. Novosibirsk, SGGA Publ., 2005, vol. 5, pp. 218–223. (In Russian)

20. Antonov V. N., Sladkikh L. A. Monitoring sostoianiia posevov i prognozirovanie urozhainosti iarovoi pshenitsy po dannym DZZ [The crops condition monitoring and forecasting of spring wheat yield according to D33 data]. *GEOMATIKA* [GEOMATICS], no. 4, 2009, pp. 50–53. (In Russian)

Статья поступила в редакцию 27 января, принята 7 апреля 2015 г.

Сведения об авторах:

Колесников Леонид Евгеньевич — кандидат биологических наук, доцент

Сурин Владимир Георгиевич — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

Киселёв Максим Владимирович — кандидат сельскохозяйственных наук, доцент

Колесникова Юлия Рудольфовна — кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник

Kolesnikov Leonid E. — Ph.D., Associate Professor

Surin Vladimir G. — Ph.D., Leading Researcher

Kiselev Maksim V. — Ph.D., Associate Professor

Kolesnikova Yulia R. — Ph.D., Research Associate