

УДК 57.084.1:632.08

## О ВЛИЯНИИ ВОЗРАСТА ПРОРОСТКОВ ПШЕНИЦЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИХ ЦИФРОВОГО ФЕНОТИПИРОВАНИЯ

Сероклинов Геннадий Васильевич (0000-0003-4816-8593)<sup>1</sup>,  
Гуныко Андрей Васильевич (0000-0002-7766-5938)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский Федеральный Научный Центр Агробиотехнологий Российской Академии Наук, Новосибирская обл., р.п. Краснообск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

**Аннотация:** в работе обсуждаются результаты цифрового фенотипирования (кластеризации) по сортам разновозрастных проростков пшеницы сортов «Новосибирская 41» и «Сибирская 21». Кратко описаны цели исследований биопотенциалов растений, условия и особенности проведения измерений. Представлены результаты фенотипирования по атрибутам сигналов биопотенциалов, возникающих при воздействии пониженной и повышенной температурой на 10-, 12- и 14-дневные проростки, полученные с применением методов кластеризации из библиотеки *scikit-learn* в среде программирования *Python*. Фиксируется частичное подтверждение гипотезы о влиянии возраста образцов на качество их кластеризации по сортам. Предлагаются направления дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** фенотипирование, *Python*, биопотенциал, возраст, пшеница, температурные воздействия.

## БУУДАЙ ӨНҮМДӨРҮНҮН ЖАШЫНЫН ТАСИРИНИН САНАРИПТИК ФЕНОТИПТЕШТИРҮҮНҮН ЖЫЙЫНТЫГЫНА ТИЙГИЗГЕН ТААСИРИ ЖӨНҮНДӨ

Сероклинов Геннадий Васильевич (0000-0003-4816-8593)<sup>1</sup>,  
Гуныко Андрей Васильевич (0000-0002-7766-5938)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Россия Илимдер академиясынын Сибирь федералдык агробиотехнология илимий борбору, Новосибирск облусу, р.п. Краснообск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирск мамлекеттик техникалык университети, Новосибирск, Россия

**Аннотация:** иште "Новосибирская 41" жана "Сибирская 21" сортторунун аркандай курактагы буудай өнүмдөрүнүн сорттору боюнча санариптик фенотиптөөнүн (кластерлештирүүнүн) натыйжалары талкууланат. Өсүмдүктөрдүн биопотенциалдарын изилдөөнүн максаттары, өлчөөлөрдү жүргүзүүнүн шарттары жана өзгөчөлүктөрү кыскача баяндалган. *Python* программалоо чөйрөсүндө *scikit-learn* китепканасынан кластерлештирүү ыкмаларын колдонуу менен алынган 10, 12 жана 14 күндүк өсүндүлөрдүн төмөнкү жана жогорку температурасынын таасиринен пайда болгон биопотенциалдардын сигналдарынын атрибуттары боюнча фенотиптештирүүнүн натыйжалары берилген. Үлгүлөрдүн жаш курагынын сорттору боюнча аларды кластерлештирүү сапатына тийгизген

таасири жөнүндөгү гипотезанын жарым-жартылай ырасталышы белгиленет. Мындан аркы изилдөөлөрдүн багыттары сунушталууда.

**Өзөктүү сөздөр:** фенотиптөөнүн, Python, биопотенциал, жашы, буудай, температура таасири.

## ON THE INFLUENCE OF THE AGE OF WHEAT SERRINGS ON THE RESULTS OF THEIR DIGITAL PHENOTYPING

Seroklinov Gennadiy Vasilievich (0000-0003-4816-8593)<sup>1</sup>,  
Goonko Andrew Vasilievich (0000-0002-7766-5938)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Siberian Federal Scientific Center of Agrobiotechnology of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk region, Krasnoobsk, Russia

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

**Abstract:** the paper discusses the results of digital phenotyping (clustering) by varieties of wheat seedlings of different ages of the varieties "Novosibirsk 41" and "Siberian 21." The objectives of studies of plant biopotentials, conditions and features of measurements are briefly described. The results of phenotyping by attributes of biopotential signals arising from exposure to low and high temperatures on 10-, 12- and 14-day seedlings obtained using clustering methods from the scikit-learn library in the Python programming environment are presented. Partial confirmation of the hypothesis about the influence of the age of samples on the quality of their clustering by varieties is recorded. Directions for further research are proposed.

**Keyword:** phenotyping, Python, biopotential, age, wheat, temperature effects.

### 1. Введение

Как известно, изменения в метаболизме растений, происходящие под воздействием температуры, выражаются в нарушении функционирования ферментных систем, регулирующих весь процесс обмена энергией, что приводит к возникновению процессов, способствующих устойчивости растений к неблагоприятным факторам окружающей среды. Эти процессы сопровождаются изменением ионной проводимости растительных клеток, характеризующим фенотип растения и, как следствие, изменением их биопотенциалов (Бос Д.Ч., 1964, 395с.). В ходе предыдущих исследований злаковых культур было накоплено свыше 18 ГБ значений измеренных сигналов, возникавших при действии на проростки различных видов,

сортов и возрастов.

Предполагается, что различные методы анализа измеренных биопотенциалов растений позволят оценить устойчивость растений к низким и высоким температурам и разработать количественные критерии различий сортов (Stahlberg R., 2006, pp. 291-308), а также разделить их на группы фенотипов (кластеры) с различными или идентичными признаками устойчивости. Это в полной мере относится к зерновым при оценке различных сортов на стадии их создания.

Ранее проведенные исследования (А. В. Goonko, 2023. P. 860–863) показали, что фиксированные с помощью автоматизированного измерительного комплекса сигналы, после соответствующей предварительной обработки и применения

методов кластерного анализа, дают возможность выделить те сорта пшеницы, которые, при попарном сравнении, позволяют однозначно отнести их к одной из категорий с одинаковым (близким) уровнем устойчивости к воздействиям повышенной или пониженной температурой (Seroklinov G.V., 2021. P. 12183.).

Целью данной работы является исследование влияния возраста проростков пшеницы сортов «Новосибирская 41» и «Сибирская 21», подвергавшихся воздействию стрессоров в виде повышения и понижения температуры, на точность (в виде количества верно и неверно разделенных на два кластера) их разделения по сортам с применением ранее рекомендованных (А. V. Goonko, 2023. P. 860–863) методов нормализации атрибутов сигналов и методов кластеризации данных из библиотеки scikit-learn (Гореестр РФ, 2009. 208 с.) среды программирования Python.

## 2. Материалы и методы исследования

Целью данной работы является исследование влияния возраста проростков пшеницы сортов «Новосибирская 41» и «Сибирская 21», подвергавшихся воздействию стрессоров в виде повышения и понижения температуры, на точность (в виде количества верно и неверно разделенных на два кластера) их разделения по сортам с применением ранее рекомендованных (А. V. Goonko, 2023. P. 860–863) методов нормализации атрибутов

сигналов и методов кластеризации данных из библиотеки scikit-learn (Гореестр РФ, 2009. 208 с.) среды программирования Python.

Выбор методов исследований детально описан в (А. V. Goonko, 2023. P. 860–863), где в качестве одного из результатов рекомендовано применение для кластеризации методами SpectralClustering, Bisecting KMeans, GaussianMixture нормализованных методом MaxAbsScaler атрибутов измеренных сигналов биопотенциалов.

## 3. Результаты исследования

В рамках данной работы производился кластерный анализ атрибутов (минимальное, среднее и максимальное значения) сигналов биопотенциалов (как непосредственно измеренных, так и подвергавшихся разным видам цифровой обработки) 10-, 12- и 14-дневных проростков пшеницы вышеуказанных сортов при воздействии на них повышенной и пониженной температурой. Результаты экспериментов предварительно оценивались на предмет их существенного отличия от соседних в группе в целях исключения случаев некорректного их проведения. В связи с этим количество образцов разных сортов составляло разное количество в зависимости от их возраста и вида воздействия, и указано в табл. 1.

Результаты в виде количества верного разделения образцов по сортам в зависимости от атрибутов сигналов и возраста проростков представлены в табл. 2 и 3. В них приняты следующие

**Таблица 1.** Количество образцов проростков пшеницы по их возрасту в днях, при воздействии теплом и холодом.

Возраст, дней	Сорт: Новосибирская 41		Сибирская 21	
	Тепло	Холод	Тепло	Холод
10	6	6	9	8
12	8	7	5	7
14	8	8	8	7
Всего	23	21	22	22

Источник: Составлено авторам

**Таблица 2.** Верное (+) и неверное (-), с указанием числа образцов другого сорта) разделение образцов проростков пшеницы по атрибутам сигналов, от их возраста в днях, при воздействии повышенной температурой.

Атрибуты:		Метод	s	f	cf	fn	cfn	fd	cfд	cfnd	a	Всего
Возраст, дней												
10	SC	+	+	-(3)	+	-(3)	-(4)	-(4)	-(4)	-(3)		3
	BS	+	+	-(3)	+	-(3)	-(2)	-(2)	-(4)	-(3)		3
	GM	+	+	-(6)	+	-(3)	-(4)	-(4)	-(4)	-(3)		3
12	SC	-(4)	-(4)	+	-(4)	-(1)	+	+	+	+		5
	BS	-(3)	-(1)	+	-(1)	-(1)	+	+	+	+		5
	GM	-(3)	-(4)	+	+	-(1)	+	+	+	+		6
14	SC	-(1)	-(4)	-(2)	-(3)	-(2)	-(2)	-(2)	-(2)	-(1)		0
	BS	-(1)	-(3)	-(2)	-(3)	-(2)	-(2)	-(2)	-(2)	-(1)		0
	GM	-(1)	+	-(2)	+	-(2)	-(5)	-(5)	-(5)	-(1)		2
Всего.			3	4	3	5	0	3	3	3	3	<b>27</b>

Источник: Составлено авторами

**Таблица 3.** Верное (+) и неверное (-), с указанием числа образцов другого сорта) разделение образцов проростков пшеницы по атрибутам сигналов, от их возраста в днях, при воздействии пониженной температурой.

Атрибуты		Метод	s	f	cf	fn	cfn	fd	cfд	cfnd	a	Всего
Возраст, дней												
10	SC	+	-(1)	-(5)	-(1)	-(5)	-(4)	-(4)	-(4)	-(1)		1
	BS	+	-(1)	-(3)	-(1)	-(6)	-(4)	-(4)	-(4)	-(1)		1
	GM	+	+	-(5)	+	-(6)	-(4)	-(4)	-(4)	-(4)		3
12	SC	-(4)	-(4)	-(4)	-(4)	-(2)	-(2)	-(2)	-(2)	-(4)		0
	BS	+	+	-(4)	-(4)	-(3)	-(2)	-(2)	-(2)	+		3
	GM	-(4)	-(4)	-(6)	-(4)	-(3)	-(6)	-(6)	-(6)	-(4)		0
14	SC	-(2)	-(2)	-(2)	-(3)	-(5)	-(3)	-(3)	-(3)	-(2)		0
	BS	-(2)	-(3)	-(4)	-(3)	-(4)	-(2)	-(2)	-(1)	-(6)		0
	GM	+	+	-(5)	-(3)	-(4)	-(2)	-(2)	-(6)	-(6)		2
Всего.			5	3	0	1	0	0	0	0	1	10

Источник: Составлено авторами

сокращения: методы кластеризации - SC (Spectral Clustering), BS (Bisecting KMeans), GM (Gaussian Mixture), атрибуты сигналов биопотенциалов: s – атрибуты (минимальное, среднее, максимальное значения) исходного сигнала, f – отфильтрованного НЧФ, cf – центрированного (сустраненной постоянной составляющей) фильтрованного сигнала, cfn – центрированного фильтрованного и нормализованного по температуре (поэлементным делением) сигнала, fd – фильтрованного и дифференцированного сигнала, cfd – центрированного фильтрованного дифференцированного сигнала, cfnd – центрированного фильтрованного нормализованного по температуре дифференцированного сигнала, а – все атрибуты.

Результаты из табл. 2 имеют нелинейную зависимость количества верных разбиений на кластеры от возраста проростков с пиком для 12-дневных образцов. Эта зависимость, с разделением по методам кластеризации, представлена на рис. 1.

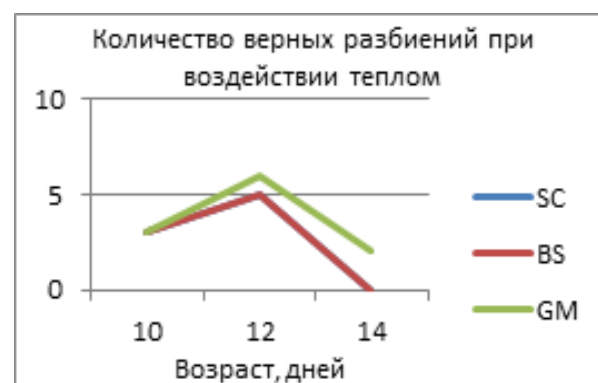
Результаты из табл. 3 еще более неоднозначны, что, впрочем, может иметь причиной слабое отличие реакции растений данных сортов на действие пониженной температуры [6]. Соответствующая диаграмма представлена на рис.2.

#### 4. Дискуссия

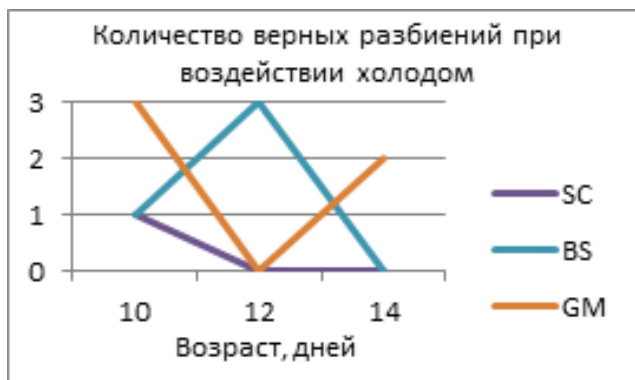
Полученные результаты свидетельствуют, что фенотипы сортов пшеницы, чьи проростки подвергались исследованиям, заметно различаются по устойчивости как к повышенной (в 21 экспериментах из 81), так и пониженной температуре (10 из 81). При воздействии повышенной температурой лучшие результаты показал метод кластеризации Gaussian Mixture при обработке сигналов 12-дневных проростков. Этот же метод показал лучшие результаты при воздействии пониженной температурой при обработке сигналов от 10- и 14-дневных проростков. Наиболее информативными оказались атрибуты таких сигналов, как

фильтрованный нормализованный при воздействии повышенной температурой, а также исходный и фильтрованный – при воздействии на проростки пониженной температурой. Гипотеза о влиянии возраста проростков на качество их кластеризации оправдалась в случае воздействия теплом 9 раз из 27 экспериментов для 10-дневных, 16 раз – для 12- и 2 – для 14-дневных проростков. Что касается воздействия пониженной температурой, то для 10-дневных образцов верное разделение по кластерам наблюдалось в 3х случаях, для 12-дневных – 3х раз и для 14-дневных – 2 раза.

Гипотеза о влиянии возраста образцов на качество их кластеризации по сортам подтверждена частично, требуется увеличение количества экспериментов по кластеризации, и если для проростков сорта «Новосибирская 41» это возможно, для нее имеются измеренные сигналы от 16- и 18-дневных проростков, то для сравнения необходимы образцы других сортов и тех же возрастов, причем желательно, чтобы сорта существенно отличались степенью своей стрессоустойчивости к воздействию повышенной или пониженной температурой. Есть, однако же, и другие варианты продолжения исследований.

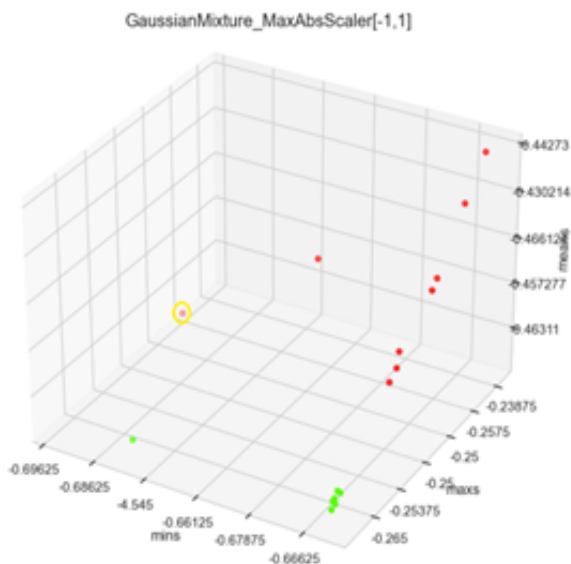


**Рис. 1.** Зависимость количества верных разбиений на кластеры от возраста проростков при воздействии на них теплом. Источник: Составлено авторами.

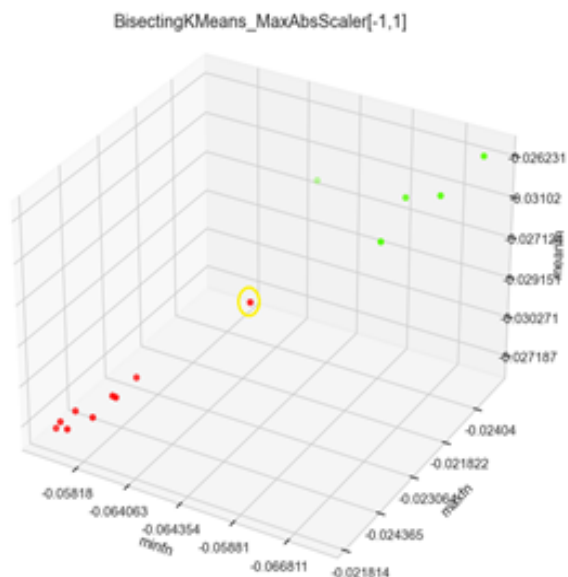


**Рис. 2.** Зависимость количества верных разбиений на кластеры от возраста проростков при воздействии на них холодом. Источник: Составлено авторами.

Один из них – удаление из выборки образцов, атрибуты сигналов которых существенно отличаются от средних по группе, в этом случае возможно повышение качества кластеризации, ориентировочно, на 5 верных разделения вышеописанных образцов при воздействии повышенной температурой и 7 – пониженной (выделены красным).



**Рис. 3.** Диаграмма рассеивания 14-дневных образцов при воздействии на них теплом и кластеризации методом GM по атрибутам исходного сигнала биопотенциала (s). Источник: Составлено авторами.



**Рис. 4.** Диаграмма рассеивания 10-дневных образцов при воздействии на них холодом и кластеризации методом BS по атрибутам фильтрованного нормализованного сигнала биопотенциала (fn). Источник: Составлено авторами.

В качестве иллюстрации целесообразности такого подхода представим на рис. 3 диаграмму рассеивания 14-дневных образцов при воздействии на них повышенной температурой и кластеризации методом GM по атрибутам исходного сигнала биопотенциала (s). Явно выпадающий из кластера образец отмечен кружком. Аналогичная диаграмма при воздействии пониженной температурой на 10-дневные проростки при кластеризации методом BS по атрибутам фильтрованного нормализованного сигнала биопотенциала (fn) представлена на рис. 4.

Другим, более перспективным направлением, видится определение коэффициента, либо регрессионного уравнения, позволяющего привести атрибуты сигналов образцов разного возраста к единой базе, тем самым увеличив их количество, подвергающее кластеризации. В этом случае можно будет отбрасывать большее количество образцов, атрибуты сигналов которых существенно отличаются от средних по группе.

## 5. Выводы

В результате цифрового фенотипирования биопотенциалов разновозрастных проростков пшеницы сортов «Новосибирская 41» и «Сибирская 21» выявлено различие фенотипов этих сортов по устойчивости к воздействиям повышенной и пониженной температур.

Частично подтверждено влияние возраста проростков пшеницы на величину их биопотенциалов что требует это учитывать, при использовании экспериментальных данных полученных для проростков разного возраста. Для чего предварительно требуется проводить обработку всего объема используемых данных по алгоритму, основанному на результатах статистических исследований исследуемых фенотипов. В связи с этим необходимо продолжить экспериментальные исследования цифрового фенотипирования для других сортов пшеницы.

## 6. Использованная литература

[1] Бос Д.Ч. Избранные произведения по раздражимости растений. – М.: «Наука», 1964, Т2, 395 с.

[2] Stahlberg R., Cleland R.E, & Van Volkenburgh E, (2006) Slow wave potentials a propagating electrical signal unique to higher plants. In *Communication in Plants - Neuronal Aspects of Plant Life* (eds F. Baluska. S, Mancuso & D. Volkmann), pp. 291-308. Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg, Germany.

[3] Application of data mining technologies for processing results of experimental studies / A. V. Goonko, G. V. Seroklinov, E. S. Devyatkin, F. S. Golubkov. – DOI 10.1109/APEIE59731.2023. 10347609. – Text : electronic // 16 International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE–2023) : proc., Novosibirsk, 10–12 Nov. 2023. – IEEE, 2023. – P. 860–863. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10347609> (access date: 18.12.2023). – ISBN 979-8-3503-3088-5.

[4] Seroklinov G.V., Gunko A.V.

Assessment of Stress Resistance of Wheat Varieties Based on the Cluster Analysis of Biopotential Parameters // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering. Krasnoyarsk, Russian Federation, 2021. P. 12183.

[5] Clustering - scikit-learn 1.2.1 documentation. Retrieved from: <https://scikit-learn.org/stable/modules/clustering.htm>

[6] Каталог сортов сельскохозяйственных культур, созданных учеными Сибири и включенных в Гореестр РФ (районированных) в 1929-2008 гг.: выпуск 4. В 2 томах. Т.1 / Рос. акад. с.-х. наук. Сиб. регион. Отд-ние. – Новосибирск, 2009. – 208 с.