

DOI: <https://doi.org/10.60797/jbg.2025.30.2>

АНАЛИЗ СТАБИЛЬНОСТИ РАЗВИТИЯ ЯЧМЕНЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СПОСОБА ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ И ДОЗЫ УДОБРЕНИЯ

Научная статья

Баранов С.Г.<sup>1,\*</sup>, Винокуров И.Ю.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0002-7778-4689;

<sup>2</sup> ORCID : 0000-0003-1423-2323;

<sup>1</sup> Владимирский государственный университет, Владимир, Российская Федерация

<sup>2</sup> Верхневолжский федеральный аграрный научный центр, Сузdal, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (bar.serg58[at]gmail.com)

**Аннотация**

Исследовано влияние методов почвенной культивации и 2-х доз удобрения на флюктуирующую асимметрию (ФА) листовой пластины ячменя (*Hordeum vulgare* L. (1753)), сорт «Суздалец». Листья (n=40) собирались с растений, выращенных на серых лесных почвах Сузdalского Ополья (Владимирская область, Россия). На сканированное изображение листьев наносились метки (50 пар) и проводился морфогеометрический анализ с определением флюктуирующей асимметрии по формуле нормирующей разности с вычетом направленной асимметрии (*t*-тест), которая была получена во всех выборках. Листовые пластины контрольных растений (без почвенной обработки и внесения комплекса удобрений) имели высокую флюктуирующую асимметрию по сравнению с экспериментальными образцами. Из четырех методов только первый — отвальная вспашка на глубину 20–22 см — способствовала повышению величины ФА. Другие методы — комбинированная, комбинированно-энергосберегающая и противоэррозионная с более глубокой обработкой почвы — показали низкие значения флюктуирующей асимметрии, меньшие по сравнению с контролем ( $F = 8,5; p = 10^{-6}$ ). Вторая доза удобрения за ротацию —  $N_{315}P_{255}K_{255}$  вызвала снижение ФА (*t*-тест;  $F = 0,1; p = 10^{-7}$ ) по сравнению с первой, меньшей дозой ( $N_{285}P_{225}K_{225}$ ). Таким образом, повышение стабильности развития (снижение ФА) происходило по мере интенсификации обработки почвы и с увеличением дозы минерального удобрения.

**Ключевые слова:** флюктуирующая асимметрия, листовая пластина ячменя, метод геометрической морфометрии, методы обработки почвы, дозы удобрения.

**ANALYSIS OF BARLEY GROWTH STABILITY DEPENDING ON SOIL CULTIVATION METHOD AND FERTILISER DOSAGE**

Research article

Baranov S.G.<sup>1,\*</sup>, Vinokurov I.Y.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0002-7778-4689;

<sup>2</sup> ORCID : 0000-0003-1423-2323;

<sup>1</sup> Vladimir State University, Vladimir, Russian Federation

<sup>2</sup> Upper Volga Federal Agrarian Scientific Center, Suzdal, Russian Federation

\* Corresponding author (bar.serg58[at]gmail.com)

**Abstract**

The influence of soil cultivation methods and two doses of fertiliser on the fluctuating asymmetry (FA) of barley (*Hordeum vulgare* L. (1753)) leaves, “Suzdalets” variety, was studied. Leaves (n=40) were collected from plants grown on gray forest soils in the Suzdal Opolye region (Vladimir Oblast, Russia). Markings (50 pairs) were applied to the scanned image of the leaves, and a morphogeometric analysis was performed to determine the fluctuating asymmetry using the normalised difference formula with the deduction of directed asymmetry (*t*-test), which was obtained in all samples. The leaf plates of control plants (without soil treatment and fertiliser application) had high fluctuating asymmetry compared to the experimental samples. Of the four methods, only the first — mouldboard plowing to a depth of 20–22 cm — contributed to an increase in FA. Other methods — combined, combined energy-saving, and anti-erosion with deeper soil cultivation — showed low values of fluctuating asymmetry, lower than the control ( $F = 8,5; p = 10^{-6}$ ). The second dose of fertiliser per rotation —  $N_{315}P_{255}K_{255}$  — caused a decrease in FA (*t*-test;  $F = 0,1; p = 10^{-7}$ ) compared to the first, smaller dose ( $N_{285}P_{225}K_{225}$ ). Thus, an increase in development stability (decrease in FA) occurred as soil cultivation intensified and the dose of mineral fertiliser increased.

**Keywords:** fluctuating asymmetry, barley leaf lamina, geometric morphometry method, soil cultivation methods, fertiliser doses.

**Введение**

Метод геометрической морфометрии, получивший развитие и признание в антропологии и морфологии животных, широко используется в системной биологии и в биологии развития [1], [2], [3]. Основным его преимуществом являются исключение различия в форме образцов и построение общей конфигурации формы биологического объекта. Сравнение формы проводится с использованием координат меток, наносимых на определенные участки как контура, так и внутренних структур. Усреднение формы позволяет сравнивать геометрические характеристики исследуемых выборок с высокой точностью, независимо от различия в форме. В настоящее время такие работы проводятся на

различных биологических объектах. Помимо площади листовой пластины, соотношения частей пластины, исследователей интересует билатеральная асимметрия, а именно флюктуирующая асимметрия (ФА), т.е. ненаправленное отклонение в левую и правую стороны от оси симметрии, что свидетельствует об изменчивости в стабильности развития.

Флюктуация латеральных структур злаковых растений значительна и зависит как от генотипа, способа возделывания почвы, объема вносимых удобрений, так и от климатических условий [4], [5], [6].

В предыдущем исследовании повышенная доза удобрения вызывала снижение стабильности развития в растениях овса и повышение стабильности развития (снижение ФА) у ячменя. Флюктуирующая асимметрия была более высокой в листьях ячменя в контрольных растениях [7].

Использованный метод определения флюктуирующей асимметрии был основан на изменчивости формы всей листовой пластины, а индекс ФА определялся на основе статистической значимости и критерии  $F$  в двухфакторном дисперсионном анализе.

В предлагаемой работе использовался упрощенный метод геометрической морфометрии с использованием различия в дисперсии левых и правых координат меток, расставляемых по краю пластины.

В нашу задачу входило изучение уровня флюктуационной изменчивости и стабильности развития в зависимости от способа обработки почвы как фактора, влияющего на структурные и биохимические свойства почвенного покрова. Изучено также влияние дозы вносимого удобрения (аммофос).

### Материал и методы

Исследования проводились в 2024–2025 гг. на опытном участке Верхневолжского федерального аграрного научного центра (ФАНЦ, 56,2157°N; 40,5166°E) и были частью эксперимента, проводимого с 1996 г. на серых лесных почвах Владимирского Ополья. Применилось 4 способа основной обработки почвы: отвальная вспашка на глубину 20–22 см — 1 об.; комбинированно-энергосберегающая на глубину 20–22 см — 2 об.; комбинированно-ярусная на глубину 25–27 см — 3 об. и противоэрзационная на глубину 25–27 см — 4 об. Использовалось также 2 дозы удобрения. Первая доза составила N<sub>45</sub>P<sub>45</sub>K<sub>45</sub>, (за ротацию N<sub>285</sub>P<sub>225</sub>K<sub>225</sub>), вторая доза — N<sub>45</sub>P<sub>45</sub>K<sub>45</sub> (за ротацию — N<sub>315</sub>P<sub>255</sub>K<sub>255</sub>).

В работе были использованы агротехнологии и официально принятые системы севооборота при выращивании ячменя (*Hordeum vulgare L.* (1753)), сорт «Суздалец».

Площадь каждой делянки составляла 35 м<sup>2</sup> (5×7). Азотнофосфорнокалийное удобрение вносились перед посевом. Делянки располагались не далее чем 100 м друг от друга и отделялись межевыми полосами (1 м) от контрольных растений. Сбор листовых пластин проводили 29 июля 2025 г. в фазе восковой спелости с 6-ти площадок (контрольные растения, полученные при 4-х способах обработки почвы и растения, выросшие при повышенной дозе удобрения).

С каждой площадки (делянки) собирались около 40 листовых флаговых пластин. Отбраковывались наиболее мелкие листья или искривленные механической деформацией. После высушивания проводилось измерение длины каждой пластинки, и из центра пластины вырезался сегмент длиной 5 см. Полученные образцы, по 26 от каждой популяции наклеивались на бумагу и сканировались с мерной линейкой сканером CanonMF 3010c разрешением 500 dpi (500 пикселей на дюйм), (рис. 1A).

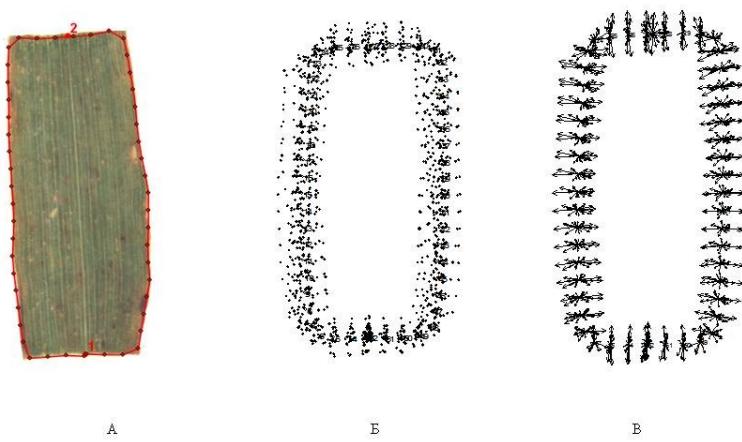


Рисунок 1 - Сегмент листовой пластины с метками после обработки в программе TPS  
DOI: <https://doi.org/10.60797/jbg.2025.30.2.1>

Примечание: А – флаговая пластина с нанесенными метками; Б – множество меток (n=26); В – направление векторов от усредненной метки после выравнивания

Геометрическая морфометрия флюктуирующей, направленной асимметрии и формы листовой пластины выполнялась пакетом программ TPS [8]. По периметру листовой пластины наносились 52 метки с равным интервалом, две первые метки служили истинными лэндмарками и обозначали ось симметрии. Программа TPSRelv проводила усреднение всех координат с вычетом различия в величине образцов и отмечала направление векторов (рис. 1Б-В).

ФА определялась по разнице дисперсии 50-ти парных меток. Сначала использовалась формула нормирующей разности с абсолютным значением  $(L-R)/(L+R)$ , где L и R, соответственно величины дисперсии каждой из 50-ти меток. Затем из каждого значения вычиталось значение направленной асимметрии (НА). После этого находилось отношение к величине НА.

Величина направленной асимметрии (абсолютная величина), как генетического компонента изменчивости, находилась по усредненному значению нормирующей формулы, взятой со знаком. Само присутствие НА определялось в двухпарном *t*-тесте с нулевой гипотезой о равенстве величин R и L.

Анализы выполнялись в среде MSExcel и STISTICA 10, статистическая значимость  $\alpha$  во всех анализах была на уровне 95%.

### Результаты и обсуждение

Длина листовых пластин ячменя различалась, т.к. однофакторный дисперсионный анализ показал статистическое значимое различие ( $F = 7,9; p = 0,00001$ ). Наибольшее значение длины пластины было в контроле и при 4-ом методе обработки почвы, соответственно,  $15,85 \pm 0,56$  и  $14,38 \pm 0,31$  см. В контрольных листьях мог доминировать компенсаторный механизм с развитием вегетативных органов, четвертый способ обработки с глубокой пропашкой мог положительно влиять на развитие вегетативных частей (листьев). Направленная асимметрия была обнаружена во всех популяциях со значимостью  $p = 10^{-2}$ - $10^{-6}$ . ФА преобладала при первом способе обработки почвы, а также, в контроле (рис. 2).

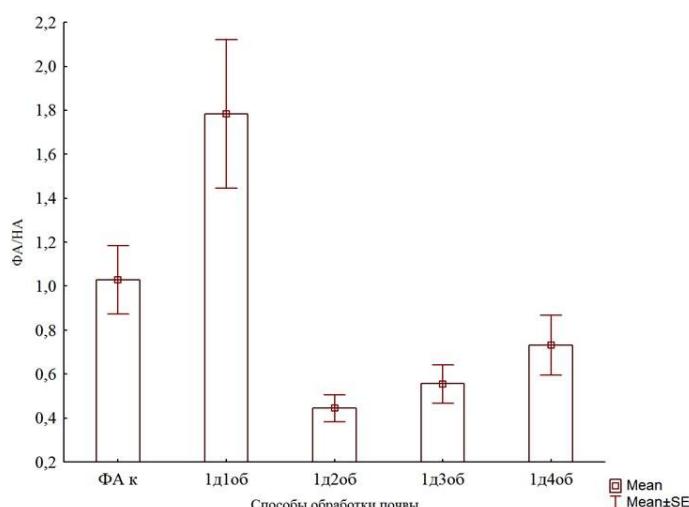


Рисунок 2 - Средние значения величины ФА/НА со стандартной ошибкой в зависимости от способа обработки почвы, ФАк – контроль ( $F = 8,5; p = 10^{-6}$ )  
DOI: <https://doi.org/10.60797/jbg.2025.30.2.2>

Проведено сравнение стабильности развития с использованием двух доз удобрения, вносившихся в почву при первом способе обработки почвы (отвальная вспашка на глубину 20–22 см). Образцы, полученные на первой дозе, показали повышенную дисперсию значения ФА/НА ( $F = 10,1; p = 10^{-7}$ ). Был применен *t*-тест для выборок с разными дисперсиями, который показал серьезное статистическое различие ( $t_{\text{стат.}} = 3,3$ ; одностороннее  $p = 0,001$ ). Таким образом, первая доза показала повышенную величину ФА (снижение уровня стабильности развития) по сравнению со второй дозой удобрения, соответственно —  $1,78 \pm 0,34$  и  $0,62 \pm 0,11$ .

### Заключение

Различие в длине листовых пластин мы объясняем, тем, что в условиях стресса (недостатка питательных веществ) растение может переориентировать свои ресурсы. Растение использует энергию на увеличение площади листьев, что позволяет ему максимально использовать доступный солнечный свет для фотосинтеза, пытаясь компенсировать дефицит питательных веществ. Возможно и другое объяснение: недостаток азота, фосфора и калия может привести к изменению соотношения ауксинов и других гормонов, стимулируя рост листовой пластины. В отсутствие удобрений, где развитие тормозится, а размножение затруднено, растение может «сфокусироваться» на вегетативной массе [9].

Известно, что культура ячменя требовательна к влаге, например, в фазе налива зерна, а склонность к кущению мы связываем с сильной примесью направленной асимметрии. Отвальный способ обработки почвы (первый) вызывал повышенную флюктуирующую асимметрию, по сравнению с более технологичными и интенсивными видами обработки почвы. Известно, что ячмень требователен к влаге, в период созревания. Предыдущее изучение морфологической особенности флаговых листьев показало более высокую нестабильность ячменя по сравнению с другими культурами, например, овсом, что соответствует общепринятым представлениям о физиологических особенностях этого сельскохозяйственного растения, принимая во внимание и стрессовые погодные условия [10].

Проведенная работа подтвердила результаты, полученные в 2022 год, т.к. повышенная доза удобрения способствовала повышению стабильности развития. В опыте 2022 года использовались растения одинаковой длины, при этом контрольные растения ячменя показали более высокую нестабильность развития, по сравнению с растениями, выращенными на повышенной дозе удобрения, которое могло стабилизировать биохимические процессы в этой относительно требовательной культуре.

## Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть представлена компетентным органам по запросу.

## Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

## Список литературы / References

1. Rohlf F.J. A revolution morphometrics / F.J. Rohlf, L.F. Marcus // Trends in Ecology & Evolution. — 1993. — Vol. 8. — № 4. — P. 129–132.
2. Rohlf F.J. On applications of geometric morphometrics to studies of ontogeny and phylogeny. / F.J. Rohlf // Systematic biology. — 1998. — Vol. 47. — № 1. — P. 147–158.
3. Marcus L.F. Overview of the New, or Geometric Morphometrics / L.F. Marcus, M. Corti // Advances in morphometrics. — 1996. — Vol. 284. — P. 1–13.
4. Баранов С.Г. Соотношение генотип-фенотип, определяемое геометрической морфометрией / С.Г. Баранов // Journal of Bioinformatics and Genomics. — 2023. — № 2 (20). — 6 с. — DOI: 10.18454/jbg.2023.20.2.003. — EDN KXRNZD.
5. Баранов С.Г. Тритикале: форма и асимметрия листовой пластины / С.Г. Баранов, С.Е. Скатова, И.Ю. Винокуров // Journal of Agriculture and Environment. — 2023. — № 2 (30). — 6 с. — DOI: 10.23649/jae.2023.2.30.003. — EDN ZJVHZY.
6. Баранов С.Г. Модель флюктуационной изменчивости на примере листовых пластин пшеницы. / С.Г. Баранов, И.Ю. Винокуров // Международный научно-исследовательский журнал. — 2023. — № 10 (136). — 7 с. — DOI: 10.23670/IRJ.2023.136.60. — EDN OVQOCU.
7. Баранов С.Г. Сравнение стабильности развития ячменя и овса в зависимости от дозы удобрения / С.Г. Баранов, И.Ю. Винокуров // Journal of Agriculture and Environment. — 2022. — № 6 (26). — 8 с. — DOI: 10.23649/jae.2022.6.26.09. — EDN FKQEHD.
8. Rohlf F.J. The tps series of software / F.J. Rohlf // Hystrix. — 2015. — Vol. 26. — № 1. — P. 1–4. — DOI: 10.4404/hystrix-26.1-11264.
9. Sosnowski J. The impact of auxin and cytokinin on the growth and development of selected crops / J. Sosnowski, M. Truba, V. Vasileva // Agriculture. — 2023. — Vol. 13. — № 3. — 14 p. — DOI: 10.3390/agriculture13030724.
10. Винокуров И.Ю. Особенности влияния на продуктивность овса и ячменя систем удобрения и севооборотов в стрессовых погодных условиях / И.Ю. Винокуров, В.В. Шаркевич // Владимирский земледелец. — 2022. — № 4 (102). — С. 9–13. — DOI: 10.24412/2225-2584-2022-4-9-13. — EDN LOVYEK.

## Список литературы на английском языке / References in English

1. Rohlf F.J. A revolution morphometrics / F.J. Rohlf, L.F. Marcus // Trends in Ecology & Evolution. — 1993. — Vol. 8. — № 4. — P. 129–132.
2. Rohlf F.J. On applications of geometric morphometrics to studies of ontogeny and phylogeny. / F.J. Rohlf // Systematic biology. — 1998. — Vol. 47. — № 1. — P. 147–158.
3. Marcus L.F. Overview of the New, or Geometric Morphometrics / L.F. Marcus, M. Corti // Advances in morphometrics. — 1996. — Vol. 284. — P. 1–13.
4. Baranov S.G. Sootnoshenie genotip-fenotip, opredelyaemoe geometricheskoi morfometriei [The Genotype-Phenotype Ratio Determined by Geometric Morphometry] / S.G. Baranov // Journal of Bioinformatics and Genomics. — № 2 (20). — 6 p. — DOI: 10.18454/jbg.2023.20.2.003. — EDN KXRNZD. [in Russian]
5. Baranov S.G. Tritikale: forma i asimmetriya listovoj plastiny [Shape and Asymmetry of the Leaf Plate] / S.G. Baranov, S.E. Skatova, I.Yu. Vinokurov // Journal of Agriculture and Environment. — 2023. — № 2 (30). — 6 p. — DOI: 10.23649/jae.2023.2.30.003. — EDN ZJVHZY. [in Russian]
6. Baranov S.G. Model fluktuatsionnoi izmenchivosti na primere listovikh plastin pshenitsi [A Model of Fluctuation Variability on the Example of Wheat Leaf Plates] / S.G. Baranov, I.Yu. Vinokurov // Mezhdunarodni nauchno-issledovatel'skii

zhurnal [International Research Journal]. — 2023. — № 10 (136). — 7 p. — DOI: 10.23670/IRJ.2023.136.60. — EDN OVQOCU. [in Russian]

7. Baranov S.G. Sravnenie stabilnosti razvitiya yachmenya i ovsa v zavisimosti ot dozi udobreniya [Comparison of Developmental Stability of Barley and Oats Depending on Fertilization Dosage] / S.G. Baranov, I.Yu. Vinokurov // Journal of Agriculture and Environment. — 2022. — № 6 (26). — 8 p. — DOI: 10.23649/jae.2022.6.26.09. — EDN FKQEHD.[in Russian]

8. Rohlf F.J. The tps series of software / F.J. Rohlf // Hystrix. — 2015. — Vol. 26. — № 1. — P. 1–4. — DOI: 10.4404/hystrix-26.1-11264.

9. Sosnowski J. The impact of auxin and cytokinin on the growth and development of selected crops / J. Sosnowski, M. Truba, V. Vasileva // Agriculture. — 2023. — Vol. 13. — № 3. — 14 p. — DOI: 10.3390/agriculture13030724.

10. Vinokurov I.Yu. Osobennosti vliyaniya na produktivnost ovsa i yachmenya sistem udobreniya i sevooborotov v stressovikh pogodnikh usloviyakh [Specific features of fertilizer systems and crop rotations on the yielding capacity of oats and barley under stress weather conditions] / I.Yu. Vinokurov, V.V. Sharkevich // Vladimirskii zemledelets [Vladimir agriculist]. — 2022. — № 4 (102). — P. 9–13. — DOI: 10.24412/2225-2584-2022-4-9-13. — EDN LOVYEK. [in Russian]