

УСТОЙЧИВОСТЬ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ: ОРГАНИЗМ

УДК 502.057:662.63:502.572:53.088

ОЦЕНКА ЗДОРОВЬЯ СРЕДЫ ПО ВЕЛИЧИНЕ ФЛУКТУИРУЮЩЕЙ АСИММЕТРИИ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ: АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ ПРИЧИН ИСКАЖЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

© 2023 г. Е. Г. Шадрина*, @, В. Ю. Солдатова**

*Институт биологических проблем криолитозоны Сибирского отделения Российской академии наук,
Федеральный исследовательский центр “Якутский научный центр СО РАН”, пр. Ленина, 41, Якутск, 677980 Россия

**Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, ул. Белинского, 58, Якутск, 677000 Россия

@E-mail: e-shadrina@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.

После доработки 28.02.2023 г.

Принята к публикации 28.02.2023 г.

Рассматриваются причины искажения результатов при оценке флуктуирующей асимметрии промеров листа древесных растений на примере березы повислой (*Betula pendula* Roth.) Приводятся результаты, полученные исследователями с разным опытом применения методики, показано, что для исследователей без опыта расхождение полученных данных, по сравнению с опытным оператором, может составлять до 50%, тогда как обучение обеспечивает получение сходных результатов. При оценке здоровья среды по величине флуктуирующей асимметрии необходимо соблюдать методические требования к сбору и обработке материала, несоблюдение которых может вызывать затруднения в интерпретации результатов.

Ключевые слова: флуктуирующая асимметрия, стабильность развития, береза повислая, *Betula pendula*, качество среды, биоиндикация

DOI: 10.31857/S1026347023600243, **EDN:** VNHJUY

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных морфогенетических критериев гомеостаза развития является показатель флуктуирующей асимметрии (ФА). Известно, что в условиях, близких к оптимальным, уровень ФА минимален, но возрастает при стрессирующем воздействии как средового, так и генетического характера (Palmer, Strobeck, 1986; Parsons, 1990, 1992). Определение величины показателя ФА лежит в основе морфогенетического подхода в биоиндикации, предложенного В.М. Захаровым (1987). Появление методики определялось требованиями времени: возрастающий антропогенный пресс на природные экосистемы диктовал необходимость разработки универсального биоиндикационного подхода, позволяющего получить сопоставимые результаты при работе с разными видами антропогенного воздействия в разных регионах (Захаров и др., 2000а). Первые публикации результатов использования этого метода появились в 1990-х гг., и первоначально исследования велись почти исключительно коллективом разработчиков методики (Кряжева и др., 1996; Последствия Чернобыльской..., 1996; Захаров и др., 2000б, 2001а, 2001б; Захаров, Чубинишвили, 2001) и небольшого числа исследователей, прошедших стажировку

(Данилов и др., 2001; Константинов, 2001; Турмухаметова, 2002; Стрельцов, 2003; Шадрина и др., 2003), но после опубликования методических рекомендаций по применению данной методики на сайте МПР РФ (Методические рекомендации..., 2003) число работ этого направления с каждым годом растет. Широкое распространение методики во многом объясняется доступностью и кажущейся простотой применения, особенно для древесных растений. Большое число работ посвящено оценке состояния среды городов, зоны воздействия промышленных предприятий, участков с повышенным радиационным фоном или уровнем загрязнения тяжелыми металлами. Наиболее часто в качестве биоиндикатора используется величина флуктуирующей асимметрии листа березы повислой (*Betula pendula* Roth., 1788) (Кряжева и др., 1996; Гелашвили и др., 2007; Солдатова, Шадрина, 2007; Турмухаметова, Шивцова, 2007; Калаев и др., 2011; Звягинцева, 2012; Зеленская и др., 2013; Ерофеева, 2015; Блашинская, Забуга, 2016; Первышина, Коротченко, 2017; Турмухаметова, 2020), но имеются также публикации с использованием других древесных растений (Шадрина и др., 2003; Василевская, Тумарова, 2005; Хузина, 2011; Мелькумов, Волков, 2014; Луговская и др., 2016; Полонский,

Полякова, 2016). Методика хорошо зарекомендовала себя при проведении комплексных исследований: сочетание разных подходов биоиндикации и биотестирования, нескольких видов-биоиндикаторов с использованием одного подхода (Последствия Чернобыльской, 1996; Захаров и др., 2000б; Шадрина и др., 2003; Шадрина, Вольперт, 2014, 2018) или разных тестов одного вида (Кряжева и др., 1996; Чистякова, Кряжева, 2001; Чубинишвили, 2001; Логинов, 2004; Иванов, 2015, Солдатова и др., 2018; Turmukhametova, Shadrina, 2000). Применение ФА позволяет сравнить результаты, полученные в разных регионах и на участках с разной антропогенной нагрузкой (Shadrina *et al.*, 2020; Turmukhametova *et al.*, 2021).

Таким образом, накопился большой массив данных, свидетельствующих о зависимости гомеостаза развития (в данном случае его отражением является показатель ФА) от суммарного стрессирующего воздействия факторов антропогенного и природного генезиса, что говорит в пользу правомерности данного подхода к оценке здоровья среды. Наряду с этим, на настоящий момент накоплен ряд публикаций, авторы которых затрудняются в интерпретации результатов, и, как следствие, приходят к выводу, что методика не пригодна для оценки качества среды (Зорина, Коросов, 2007; Шабалина, Демьяненко, 2011; Рахмангулов и др., 2014; Коротеева и др., 2015). В большинстве случаев авторы не могут объяснить полученные результаты воздействием тех или иных конкретных загрязнителей, в ряде случаев отмечены аномально высокие показатели ФА (Иванов и др., 2015; Блашинская, Забуга, 2016). Для березы повислой (вида наиболее часто используемого для оценки здоровья среды) балльная шкала оценивает ФА около 0.040 как благополучное состояние, а свыше 0.054 — как критическое (Методические рекомендации..., 2003). В многолетней практике опытными исследователями не отмечено результатов ниже 0.030 и свыше 0.069. Это объяснимо: варьирование показателя не безгранично, и резкие нарушения стабильности развития скорее приводят не к повышению ФА, а к гибели организма. В связи с этим получение экстремальных результатов (менее 0.03 и свыше 0.069), должно служить основанием для проведения сверки и поиска причин получения аномальных значений.

Это свидетельствует о необходимости корректировки и уточнения методических указаний по оценке здоровья среды по величине показателя ФА древесных растений, а также рассмотрения причин возможных ошибок при ее применении. В связи с этим целью нашего исследования была оценка влияния разных субъективных и объективных факторов на показатель ФА древесных растений и анализ причин затруднения интерпретации результатов биоиндикационного исследования.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования по оценке качества среды в природных и антропогенно трансформированных биотопах нами ведутся с 1996 г. В данном исследовании для оценки влияния биотических и абиотических факторов на ФА деревьев проанализировано 12 000 листьев из природных биотопов Восточной Сибири (Якутия). Основной объект исследования — береза повислая *Betula pendula* Roth. Для оценки влияния квалификации исследователя на результаты оценки величины показателя ФА проанализировано 1 800 листьев березы повислой, собранных на территории г. Якутска и в природных биотопах. В каждой точке собирали по 100 листьев (по 10 штук с 10 растений). Сбор материала осуществляли согласно требованиям методики (Захаров и др., 2000а; Методические рекомендации..., 2003), за исключением случаев, когда в целях проверки значимости соблюдения методических требований отбор проб осуществляли с намеренными отклонениями от предлагаемых рекомендаций. При проверке эффективности измерений для каждой выборки промеры проведены разными исследователями в 3-кратной повторности, все пробы были зашифрованы. Промеры выполнялись на сканированных изображениях, линейные промеры с точностью до 0.1 мм и угловые — до 0.1° в программе “Bio” (разработка авторов). При сканировании установлено разрешение 300 dpi. Для оценки влияния способа измерения вручную промеры выполняли при помощи линейки и транспортира (точность 1 мм и 1° соответственно) и штангенциркуля и транспортира (точность 0.1 мм и 1°). Для оценки влияния опыта работы проанализированы результаты исследователей с опытом применения методики (в данном случае свыше 15–20 лет) (квалифицированный исследователь, КИ-20), 2 года (квалифицированный исследователь, КИ-2), а также без опыта использования данной методики (КИ-0). В качестве группы исследователей без опыта работы промеры проводили студенты 3–4 курса биологического отделения Института естественных наук СВФУ. В качестве показателя ФА использовали интегральный показатель, вычисленный по 5 признакам строения и жилкования листовой пластинки (рис. 1).

В качестве показателя, оценивающего ошибку измерения, ввели показатель М:

$$M = \left| \frac{(FA_e - FA_t)}{2(FA_e + FA_t)} \right|,$$

где М — ошибка измерения, FA_e — показатель ФА, полученный квалифицированным исследователем, FA_t — показатель ФА, полученный тестируемым исследователем.

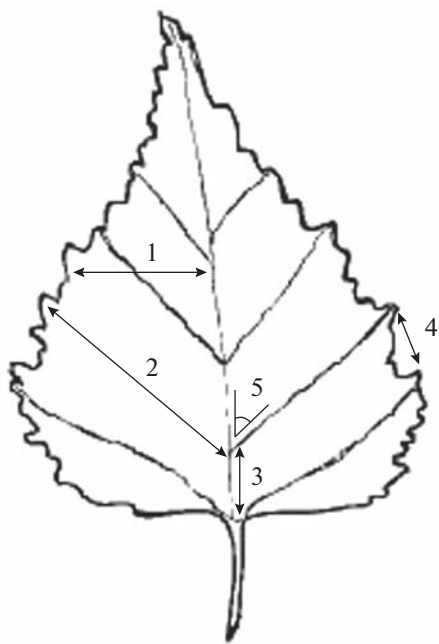


Рис. 1. Схема морфологических признаков, использованных для оценки ФА березы повислой *Betula pendula* (Методические рекомендации..., 2003). Обозначения: 1 — ширина полулиста; 2 — длина второй от основания листа жилки второго порядка; 3 — расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка; 4 — расстояние между концами первой и второй жилок второго порядка; 5 — угол между главной жилкой и второй от основания листа жилкой второго порядка.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Трудности в интерпретации результатов при применении любой методики могут быть вызваны как объективными, так и субъективными факторами. В случае работы с данной методикой к объективным следует отнести различия в величине показателя ФА деревьев разных возрастных групп, произрастающих в условиях разной затененности, разных размеров листовой пластинки и прочие факторы, не зависящие от исследователя, но которые необходимо учитывать при отборе проб. К субъективным факторам следует отнести все моменты, связанные с навыками исследователя, — соблюдение методики при отборе проб, способ выполнения промеров, воспроизводимость результатов, ориентированность на результат (как положительный, так и отрицательный). Нами проанализированы возможные причины аномалий на всех этапах работы — от отбора проб до их обработки и интерпретации полученных данных.

Сбор материала. Этот этап — один из важнейших моментов исследования. При сборе материала для оценки ФА одним из наиболее трудных моментов является поиск сходных экологических

условий и деревьев сходного возраста. Ранее было показано, что биотопические условия играют важную роль даже при оценке природных экосистем (Захаров и др., 2001а; Шадрина, Вольперт, 2014, 2018; Шадрина, Солдатова, 2017). Повышение ФА прослеживается в ряду: разреженные древостои — березняк — смешанный лес. В наших материалах показатель ФА берез, произрастающих на гари, на обедненных почвах на каменистом склоне или в густых насаждениях 0.050–0.053 (Шадрина, Вольперт, 2014) сопоставим с таковым для растений, существующих в условиях высокой автотранспортной нагрузки (Солдатова, Шадрина, 2007). Это демонстрирует универсальность реакции — нарушения стабильности развития в ответ на влияние разных негативных факторов. Естественно, что выбор неблагоприятных биотопов в качестве контрольных может привести к ошибочному заключению о том, что методика слабо отражает антропогенное воздействие, тогда как на деле сравниваются две “неблагополучные” популяции с разными стрессирующими факторами.

Повышение уровня ФА, отражающее дестабилизацию онтогенеза, наблюдается у растений и животных в условиях экологической периферии ареала — при подъеме в горы и вблизи северной границы распространения видов (Wilsey *et al.*, 1998; Захаров и др., 2001а; Hagen *et al.*, 2008; Шадрина, Вольперт, 2014; Shadrina, Volpert, 2016; Шадрина, Солдатова, 2017; Zakharov *et al.*, 2020). Кроме того, даже в центральных районах ареала могут прослеживаться последствия влияния климатических факторов (Shadrina *et al.*, 2020; Turmukhametova *et al.*, 2021), что необходимо учитывать при выборе условного контроля для используемых видов-биоиндикаторов.

Необходимо также учитывать возрастное состояние деревьев. При анализе возрастных различий мы рассматривали 5 возрастных групп — корневая поросль высотой менее 1 м, молодые прегенеративные, средневозрастные, полновозрастные и сенильные деревья. Резкие отклонения величины ФА отмечены только в двух крайних группах, причем для корневой поросли, по-видимому, имеет значение размер листовой пластинки и затенение: более высокие показатели ФА отмечены у корневой поросли с очень крупными листовыми пластинками (рис. 2а). Сенильные деревья характеризовались ФА свыше 0.060, независимо от размеров листьев (Шадрина, Солдатова, 2017). Кроме того, согласно методике, листья следует собирать только после полного завершения формирования листовой пластинки, в условиях Якутии — не ранее начала июля. Для листьев, собранных ранее этого срока, отмечены статистически значимые различия показателя ФА по сравнению с показателем тех же деревьев в середине — конце лета (рис. 2б). Также отмечено, что очень мелкие и очень крупные листовые пластинки характери-

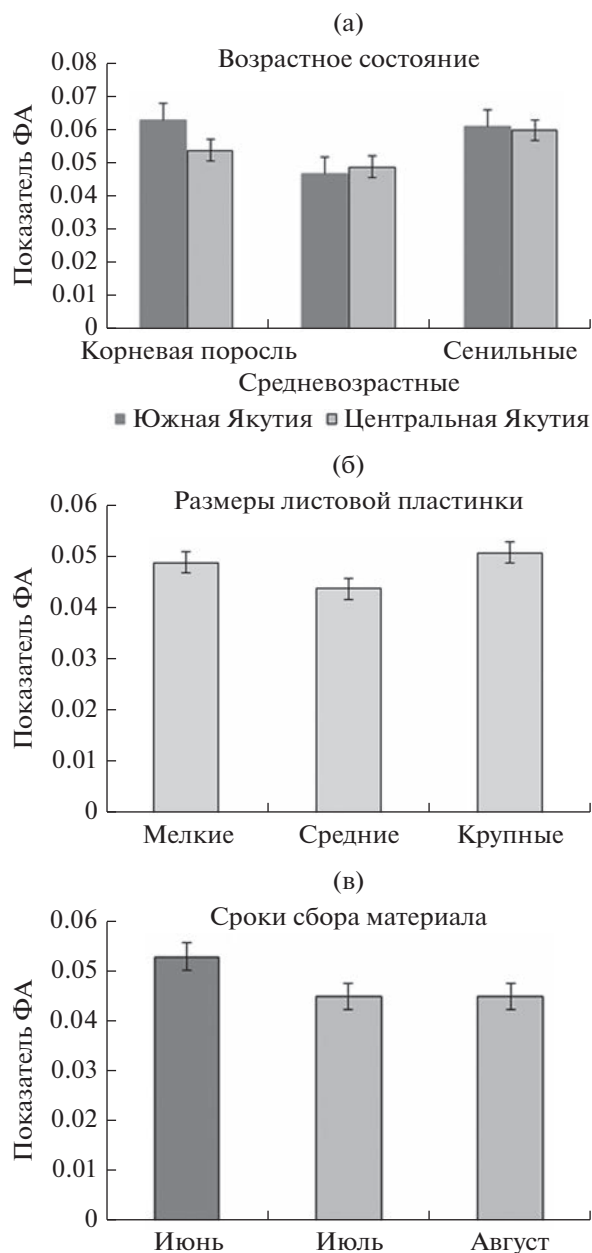


Рис. 2. Влияние возрастного состояния (а), размеров листа (б) и сроков сбора материала (в) на величину ФА березы повислой.

зуются более высоким показателем ФА, чем листья средних (для данного растения) размеров, собранные с тех же деревьев в те же сроки (рис. 2в). С фактором влияния “затененности – освещенности” связана также необходимость отбора проб по всему периметру кроны.

Ранее был поставлен вопрос о возможном влиянии типа побега на величину показателя ФА (Кряжева и др., 1996). Отмечалось, что величина показателя ФА листьев с удлинённых побегов березы повислой выше, чем с укороченных у молодых

генеративных деревьев, у средневозрастных – почти такая же, а у старых генеративных деревьев – даже ниже, при этом величина показателя для укороченного типа побега не зависит от возрастного состояния особи (Турмухаметова, Шивцова, 2007). Отмечалось также, что листьям с удлинённых побегов свойственны значительные флуктуации величины ФА, в противоположность листьям с укороченных побегов (Кулеш и др., 2014), изменчивость величины ФА для листьев с удлинённых побегов наиболее ярко выражена у молодых растений (Шадрина, Солдатова, 2017). Таким образом, совокупность данных разных авторов свидетельствует о том, что в целях биоиндикации отбор листьев следует производить с укороченных побегов.

Требование к целостности листовых пластинок объясняется двумя группами факторов: во-первых, при отборе проб исследователь не всегда может оценить, затронуты ли повреждениями участки, необходимые для оценки ФА, во-вторых, уровень ФА листа может быть связан с лесопатологическим состоянием, наличием болезней и вредителей (Hagen *et al.*, 2003; Гелашвили и др., 2007; Santos *et al.*, 2013; Шадрина, Солдатова, 2017; Шадрина, Вольперт, 2018; Cuevas-Reyes *et al.*, 2018). Для березы повислой, ивы корзиночной и черемухи отмечена связь показателя ФА с повреждениями листа вредителями, причем эта закономерность отмечена для разных групп вредителей – грызущих и галлобобразующих насекомых и клещей, а также грибковых поражений (Шадрина, Солдатова, 2017; Шадрина, Вольперт, 2018). У березы повислой показатель ФА при поражении вредителями может возрастать до уровня, сопоставимого с пятым баллом шкалы, свидетельствующем о критическом состоянии растений.

Помимо перечисленных факторов, повышение ФА может наблюдаться при генетическом стрессе (Захаров, 1987; Wilsey *et al.*, 1998; Захаров и др., 2001а; Hagen *et al.*, 2008; Cuevas-Reyes *et al.*, 2018; Zakharov *et al.*, 2020). Во избежание влияния данного фактора рекомендуется выбирать для анализа только растения несомненной видовой принадлежности (Захаров и др., 2000а).

Таким образом, при сборе материала для оценки здоровья среды по величине ФА древесных растений необходимо соблюдать целый ряд требований, их несоблюдение может привести к получению трудно интерпретируемых результатов.

Обработка материала. Со времени разработки методики оценки здоровья среды (Захаров и др., 2000а; Методические рекомендации..., 2003) усовершенствовались как приборная база, так и программное обеспечение, прогрессировала методика промеров. При этом часть исследователей производит промеры при помощи линейки и транспортира (точность 1 мм и 1° соответственно), часть ис-

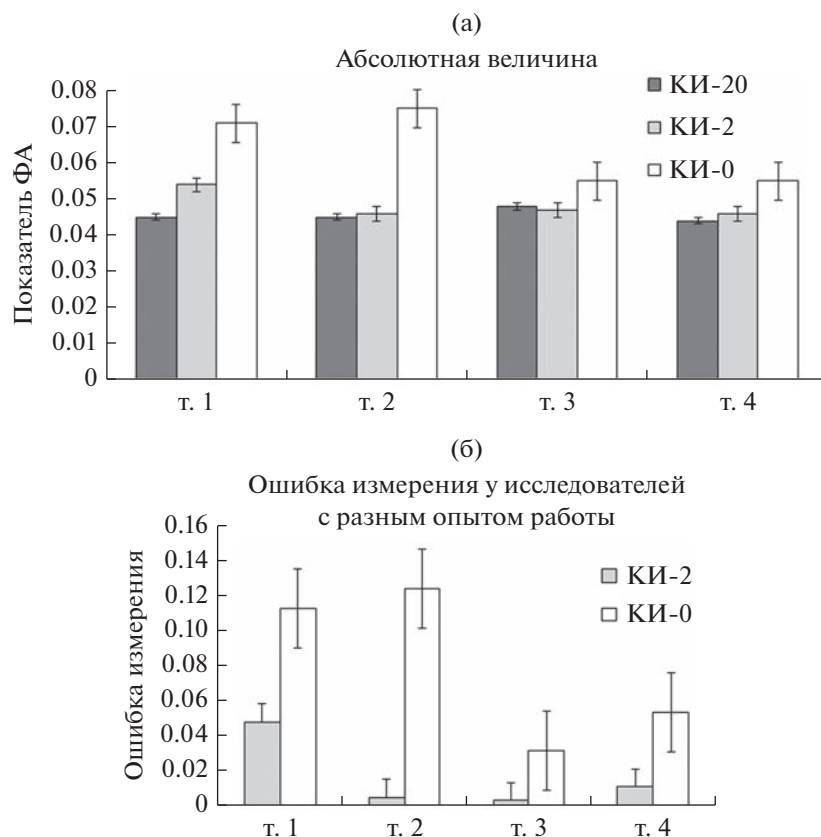


Рис. 3. Величина ФА березы повислой (а) и ошибка измерения (б) у исследователей с разным опытом. Опыт исследований: КИ-20 – 20 лет, КИ-2 – 2 года, КИ-0 – опыт отсутствует.

следователей те же промеры выполняет штангенциркулем и транспортиром (точность 0.1 мм и 1°). Многие исследователи работают со сканированными изображениями с использованием разных программ (“Photoshop” или самостоятельно разработанные, такие как используемые нами “Bio”), точность промеров повышается до 0.1 мм и 0.1°, а увеличение изображений обеспечивает более высокий уровень точности измерения. При этом значение имеет как способ измерения, так и квалификация исследователя.

За период работы по оценке качества среды проведено обучение более 20 молодых исследователей (студентов и аспирантов). Алгоритм обучения включал несколько этапов: 1) освоение методики работы в программе “Bio” и промеры пробы 10 листьев совместно с опытным исследователем; 2) самостоятельное измерение и обсчет результатов пробы 100 листьев независимо начинающим и опытным исследователем; 3) сверка результатов работы; 4) анализ причин расхождения результатов (если таковые имеются); 5) самостоятельное измерение другой пробы. Обучение считалось удовлетворительным при сходстве величины показателя ФА разных операторов с точностью до 0.002 (при ошибке 0.002–0.003).

Группа исследователей без опыта работы промеры – студенты 3–4 курса биологического отделения Института естественных наук СВФУ. Были проанализированы промеры 15 пар студентов, выполненные вручную и в программе “Bio”.

В первом эксперименте замеры листьев березы проводили параллельно и независимо друг от друга три исследователя – два с разным опытом работы (промеряли все четыре пробы) и четыре без опыта (по одному оператору на одну пробу). По результатам опытного исследователя, величина показателя ФА в рассматриваемых точках варьировала в пределах 0.044–0.048 (рис. 3а), для оператора с опытом работы около одного года те же показатели составили 0.046–0.054, тогда как исследователи, впервые оценивавшие ФА, получили результаты от 0.055 до 0.071. При этом статистически значимое расхождение в результатах между операторами с опытом работы наблюдалось лишь для одной пробы из четырех, а промеры для разных групп операторов коррелировали (коэффициент корреляции Пирсона $r = 0.85$, $p < 0.0001$). Различия с результатами операторов без опыта во всех случаях были статистически значимыми (рис. 3б).

Во втором эксперименте в качестве эталона снова были взяты промеры квалифицированного

Таблица 1. Влияние опыта исследователя и способа измерения на величину показателя ФА березы повислой (антропогенное воздействие, территория г. Якутска)

Точки	Опыт исследований 20 лет, "Bio"	Опыт отсутствует	
		компьютерная программа "Bio"	штангенциркуль и транспортир
1	0.042 ± 0.0019	0.046 ± 0.0023	0.045 ± 0.0024
2	0.045 ± 0.0018	0.057 ± 0.0030	0.054 ± 0.0029
3	0.048 ± 0.0025	0.054 ± 0.0031	0.072 ± 0.0052
4	0.055 ± 0.0025	0.056 ± 0.0042	0.061 ± 0.0042
5	0.051 ± 0.0023	0.053 ± 0.0033	0.064 ± 0.0023
6	0.053 ± 0.0024	0.057 ± 0.0030	0.066 ± 0.0030
7	0.045 ± 0.0021	0.051 ± 0.0022	0.049 ± 0.0027
8	0.048 ± 0.0024	0.050 ± 0.0023	0.067 ± 0.0050
9	0.051 ± 0.0028	0.073 ± 0.0062	0.065 ± 0.0080
10	0.046 ± 0.0019	—	0.053 ± 0.0022
11	0.048 ± 0.0023	—	0.066 ± 0.0033

исследователя, КИ-20, а исследователям группы КИ-0 было предложено дважды провести промеры листьев — вручную и в программе "Bio". В этом случае КИ-0 работали попарно, совещаясь при выполнении промеров. Значения ФА по оценке КИ-20 составляли от 0.042 до 0.055, тогда как по мнению КИ-0 показатель варьировал в пределах 0.045–0.073 (табл. 1). В целом, во всех случаях показатель ФА у неопытных исследователей был выше, чем у квалифицированного исследователя, но при этом в пяти случаях из девяти при промерах компьютерным способом различия не достигали статистически значимого уровня, в четырех случаях у операторов без опыта работы показатели ФА при замерах вручную и в программе были сходными, и лишь в одном случае вручную получен показатель статистически значимо ниже, чем при работе в программе.

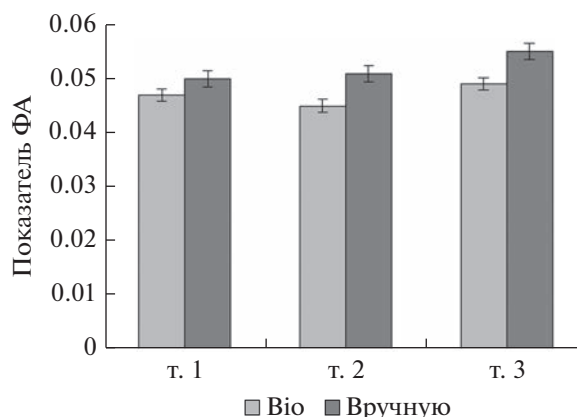
Третья часть эксперимента по оценке влияния способа измерения на результат связана с самоконтролем исследователя в группе КИ-2. Оценка проб проведена в программе "Bio", а затем вручную, с интервалом 3 месяца, пробы в обоих случаях были зашифрованы. Для всех трех выборок результаты промеров вручную были выше, но статистически значимого уровня различия достигали только для точки 2 (рис. 4), а результаты характеризовались высоким уровнем корреляции $r = 0.85$ ($p < 0.001$). У квалифицированных исследователей промеры вручную дают удовлетворительные результаты, близкие к результатам применения компьютерной программы.

Таким образом, анализ результатов, полученных исследователями с разным опытом работы и разными способами измерения показал, что успешное овладение методикой требует обязательной сверки и анализа ошибок. Исследователь может получить адекватные результаты после 2–4-кратной

проверки (при этом немаловажную роль играют индивидуальные особенности оператора). Так, при освоении методики в программе "Bio" удовлетворительные результаты после первого цикла обучения получены только у одного оператора из двадцати. Результаты измерения вручную неопытным исследователем дают завышение результатов до 50%. Можно предположить, что часть исследований, получивших аномально высокие уровни ФА, связана именно с такого рода ошибкой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование свидетельствует о том, что наряду с объективными трудностями оценки качества среды по показателю ФА древесных растений существуют субъективные факторы, которые могут повлиять на результат и за-

**Рис. 4.** Результаты измерения ФА березы повислой вручную и в программе Bio исследователем с опытом работы 2 года, самоконтроль.

труднить интерпретацию результатов. Причиной получения некорректных результатов может быть несоблюдение методики сбора материала, а также ошибки при его обработке. При сборе материала для оценки здоровья среды по величине ФА древесных растений необходимо соблюдать целый ряд требований, это:

1) выбирать деревья с четко выраженными видовыми признаками во избежание влияния генетического стресса;

2) листья должны быть собраны с растений, находящихся в сходных экологических условиях (для березы рекомендуется выбирать деревья, растущие на открытых участках, т. к. условия затенения являются стрессовыми для вида);

3) выбирать деревья, достигшие генеративного возрастного состояния, но не сенильные;

4) сбор материала проводить после завершения формирования листьев, из нижней части кроны дерева равномерно по всему периметру;

5) отбирать для анализа листья с укороченных побегов, размер листьев должен быть средним для данного растения, отбирать следует неповрежденные листья (повреждение листа может быть фактором, влияющим на повышение показателя).

Несоблюдение методических требований к сбору материала может привести как к искажению результатов (главным образом, завышению показателя ФА), так и к трудно интерпретируемым результатам (когда в неправильно подобранных контрольных биотопах показатель ФА может быть выше, чем в нарушенных).

При освоении методики и в ходе обработки материала необходимо удостовериться в воспроизводимости результатов. Качество измерения величины показателя ФА зависит, прежде всего, не от способа измерения, а от квалификации оператора. Для исследователей, освоивших методику, результаты промеров вручную и с применением тех или иных компьютерных программ оказываются близкими. Для неквалифицированного исследователя ошибка измерения может достигать 50%, а отклонения в измерениях выше при ручном способе. Таким образом, кажущаяся простота методики может играть негативную роль. Для получения адекватных результатов необходима стажировка в центрах, занимающихся подобными оценками.

В опубликованных ранее методических рекомендациях (Методические рекомендации..., 2003) специально не оговариваются общие положения, которые обычно считаются неотъемлемой частью любого научного исследования. При сборе и обработке материала работа с зашифрованными пробами позволяет избежать вопросов о возможной предвзятости и ориентированности на результат. Необходима четкая регламентация ряда моментов:

1. Правильная постановка задачи. Методика оценки здоровья среды подразумевает возможность оценки суммарного негативного воздействия, которое нарушает гомеостаз развития. Факторы слабой и очень слабой интенсивности могут не повлиять на уровень ФА. Необходимо учитывать, что для отклонений от нормального развития необходимы пороговые воздействия, т.е. такие, интенсивность которых превышает эволюционно обусловленную норму. Разные факторы могут вызывать сходную реакцию. Если в цели исследований входит выявление влияния какого-либо одного фактора, при постановке задачи необходимо учитывать возможные побочные воздействия других факторов.

2. Выбор пунктов для оценки природного фонового состояния — один из самых ответственных моментов исследования. При выборе точек необходимо, прежде всего, руководствоваться общим состоянием видов-биоиндикаторов, удалением от возможных источников загрязнения. Выбор ранее освоенных территорий (заброшенных пашен, ферм, лесополос, пустырей) нежелателен, т.к. в таких местах возможно наличие негативных последствий предыдущего антропогенного воздействия.

3. Балльная шкала разработана для конкретных видов. Исследование новых видов требует адаптации методики. При этом балльную шкалу необходимо верифицировать для каждого нового вида и, при необходимости, вносить в нее поправки.

Благодарности и источники финансирования. Работа выполнена в рамках госзадания ФИЦ ЯНЦ СО РАН по проекту “Растительный покров криолитозоны таежной Якутии: биоразнообразие, средообразующие функции, охрана и рациональное использование” (код научной темы: FWRS-2021-0023; номер гос. регистрации в ЕГИСУ: 1021061710089-0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Блащинская О.Н., Забуга Г.А. Исследование флуктуирующей асимметрии листьев березы повислой урбо-территории г. Ангарска // Научный альманах. 2016. № 7–2(21). С. 43–46.
<https://doi.org/10.17117/na.2016.07.02.043>
<http://ucom.ru/doc/na.2016.07.02.043.pdf>
- Василевская Н.В., Тумарова Ю.М. Оценка стабильности развития популяций *Pinus sylvestris* L. в условиях аэротехногенного загрязнения (Мурманская область) // Биогеография Карелии. Труды Карельского НЦ РАН. Петрозаводск. 2005. Вып. 7. С. 21–25.
- Гелаишвили Д.Б., Лобанова И.В., Ерофеева Е.А., Наумова М.М. Влияние лесопатологического состояния березы повислой на величину флуктуирующей асимметрии листовой пластинки // Поволжский экологический журн. 2007. № 2. С. 106–115.

- Данилов В.А., Вольперт Я.Л., Шадрина Е.Г. Биоиндикационная оценка воздействия горнодобывающей промышленности на биоценозы бассейна р. Алдан // Наука и образование. Якутск, 2001. № 1. С. 30–34.
- Ерофеева Е.А. Флуктуирующая асимметрия листа *Betula pendula* (Betulaceae) в условиях автотранспортного загрязнения (г. Нижний Новгород) // Растительные ресурсы. 2015. Т. 51. № 3. С. 366–383.
- Захаров В.М. Асимметрия животных. М.: Наука, 1987. 216 с.
- Захаров В.М., Баранов А.С., Борисов В.И., Валецкий А.В., Кряжева Н.Г., Чистякова Е.К., Чубинишвили А.Т. Здоровье среды: Методика оценки. М.: Центр экологической политики России, 2000а. 68 с.
- Захаров В.М., Чубинишвили А.Т., Дмитриев С.Г., Баранов А.С., Борисов В.И., Валецкий А.В., Крысанов Е.Ю., Кряжева Н.Г., Пронин А.В., Чистякова Е.К. Здоровье среды: практика оценки. М.: Центр экологической политики России, 2000б. 320 с.
- Захаров В.М., Жданова Н.П., Кирик Е.Ф., Шкиль Ф.Н. Онтогенез и популяция: оценка стабильности развития в природных популяциях // Онтогенез. 2001а. Т. 32. № 6. С. 404–421.
- Захаров В.М., Чубинишвили А.Т. Мониторинг здоровья среды на охраняемых природных территориях. М.: Центр экологической политики России, 2001. 148 с.
- Захаров В.М., Чубинишвили А.Т., Баранов А.С., Борисов В.И., Валецкий А.В., Кряжева Н.Г., Чистякова Е.К. Здоровье среды: методика и практика оценки в Москве. М.: Центр экологической политики России, 2001б. 68 с.
- Звягинцева О.Ю. Оценка качества атмосферного воздуха по величине флуктуирующей асимметрии *Betula pendula* Roth. // Ученые Записки ЗабГГПУ. Серия: Биологические науки. 2012. № 1(42). С. 87–91.
- Зеленская Т.Г., Мандра Ю.А., Степаненко Е.Е., Еременко Р.С. Влияние загрязнения компонентов урбанизированной среды на рост и развитие березы повислой // Вестник АПК Ставрополя. 2013. № 4(12). С. 170–173.
- Зорина А.А., Коросов А.В. Характеристика флуктуирующей асимметрии листа двух видов берез в Карелии // Экология. Экспериментальная генетика и физиология. Труды Карельского НЦ РАН. Петрозаводск. 2007. Вып. 11. С. 28–36.
- Иванов В.П., Иванов Ю.В., Марченко С.И., Кузнецов В.В. Использование индексов флуктуирующей асимметрии листа березы повислой для диагностики состояния фитоценозов в условиях техногенного загрязнения // Физиология растений. 2015. Т. 62. № 3. С. 368–377.
<https://doi.org/10.7868/S0015330315030082>
- Калаев В.Н., Игнатова И.В., Третьякова В.В., Артюхов В.Г., Савко А.Д. Биоиндикация загрязнения районов г. Воронежа по величине флуктуирующей асимметрии листовой пластинки березы повислой // Вестник ВГУ, Серия: химия. биология. Фармация. 2011. № 2. С. 168–175.
- Константинов Е.Л. Особенности ФА листовой пластинки березы повислой (*Betula pendula*) как вида биоиндикатора / Автореф. дис. канд. биол. наук (03.00.16). Калуга, 2001. 19 с.
- Коротеева Е.В., Веселкин Д.В., Куянцева Н.Б., Чащина О.Е. В градиенте влияния выбросов Карабашского медеплавильного комбината изменяется размер, но не флуктуирующая асимметрия листа березы повислой // Докл. РАН. 2015. Т. 460. № 3. С. 364–367.
- Коротченко И.С. Биоиндикация загрязнения районов г. Красноярска по величине флуктуирующей асимметрии листовой пластинки вяза приземистого // Вестник КрасГАУ. 2015. № 11(110). С. 67–72.
- Кряжева Н.Г., Чистякова Е.К., Захаров В.М. Анализ стабильности развития березы повислой в условиях химического загрязнения. // Экология. 1996. № 6. С. 441–444.
- Кулеш К.М., Исаева А.С., Приймак П.Г. Особенности распределения индекса флуктуирующей асимметрии листьев брахибластов и ауксбластов берез // Охрана окружающей среды и здоровья человека в РФ и странах Евросоюза: матер. междунар. научно-практ. конф. Мурманск, 31 октября 2014 г. / ред. кол.: Минченко Е.Е., Федотова Л.В., Яшкина А.А. Мурманск: изд-во МГТУ, 2014. С. 47–52.
- Логинов В.В. Фенотипическая изменчивость и цитогенетические характеристики природных популяций зеленых и бурых лягушек, обитающих на антропогенно-трансформированных и заповедных территориях: Автореф. дис. канд. биол. наук. Нижний Новгород, 2004. 24 с.
- Луговская Л.А., Межова Л.А., Землякова А.В. Оценка комфортности среды по флуктуирующей асимметрии дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) // Научные Ведомости. Серия Естественные науки. 2016. № 18(239). Выпуск 36. С. 87–94.
- Лукина Ю.М., Василевская Н.В. Влияние промышленных выбросов комбината “Североникель” на стабильность развития популяции *Betula czerepanovii* Orlova // Экологические проблемы промышленных городов: сборник научных тр. 5 Всерос. научно-практ. конференции с междунар. участием. Саратов, 12–14 апреля 2011 г. / под ред. Е.И. Тихомировой. Саратов: изд-во СГТУ. 2011. С. 244–246.
- Мелькумов Г.М., Волков Д.Э. Флуктуирующая асимметрия листовых пластинок клена остролистного (*Acer platanoides* L.) как тест экологического состояния паркоценозов городской зоны // Вестник ВГУ, Серия: География. Геоэкология. 2014. № 3. С. 95–98.
- Методические рекомендации по выполнению оценки качества среды по состоянию живых существ (оценка стабильности развития живых организмов по уровню асимметрии морфологических структур). М.: Мин-во природных ресурсов РФ, гос. служба охраны ООС (Росэкология), 2003. 25 с.
- Первышина Г.Г., Коротченко И.С. Оценка стабильности развития березы повислой, произрастающей вблизи месторождений “Бородинское” и “Итатское” Канско-Ачинского угольного бассейна // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2017. № 9(132). С. 116–121.
- Полонский В.И., Полякова И.С. Флуктуирующая асимметрия листьев: механизм формирования и применение в фитоиндикации // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2016. № 15. С. 506–510.

- Последствия Чернобыльской катастрофы: Здоровье среды / Под ред. В.М. Захарова, Е.Ю. Крысанова. М., 1996. 169 с.
- Рахмангулов Р.С., Ишбирдин А.Р., Салнагарова А.С. Флуктуирующая асимметрия — показатель дестабилизации или поиск путей адаптивного морфогенеза? // Вестник Башкирского университета. 2014. Т. 19. № 3. 831–834.
- Солдатова В.Ю., Шадрина Е.Г., Новгородова Д.Н. Биоиндикационная оценка качества среды административных округов г. Якутска по показателям флуктуирующей асимметрии и качества семян березы повислой *Betula pendula* Roth. // Изв. Саратов. ун-та. нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2018. Т. 18. Вып. 2. С. 216–224.
- Солдатова В.Ю., Шадрина Е.Г. Флуктуирующая асимметрия березы плосколистной (*Betula platyphylla* Sukacz.) как показатель качества городской среды // Проблемы региональной экологии. 2007. № 5. С. 70–74.
- Стрельцов А.Б. Региональная система биологического мониторинга. Калуга: изд-во Калужского ЦНТИ, 2003. 158 с.
- Турмухаметова Н.В. Асимметрия листа *Betula pendula* Roth. и *Fragaria vesca* L. как показатель здоровья среды // Актуальные проблемы биологии и экологии: материалы докладов VIII Молодежной научной конференции. 18–20 апреля 2001 г., Сыктывкар, Республика Коми, Россия / Российская академия наук, Уральское отделение, Коми научный центр, Институт биологии; редколлегия: Т.К. Голловко [и др.]. Сыктывкар, 2002. С. 306–309.
- Турмухаметова Н.В., Шивцова И.В. Морфологический подход к оценке состояния среды по асимметрии листа *Betula pendula* Roth. и *Fragaria vesca* L. // Лесной вестник. 2007. № 5. С. 140–143.
- Турмухаметова Н.В. Оценка состояния среды Йошкар-Олы по морфометрическим показателям *Betula pendula* Roth. // Изв. РАН. Сер. Биол. 2020. № 2. С. 197–204.
<https://doi.org/10.31857/S0002332920020095>
- Хузина Г.Р. Характеристика флуктуирующей асимметрии билатеральных признаков листа липы мелколистной (*Tilia cordata* L.) // Вестник Удмуртского университета. Сер. Биология. Науки о Земле. 2011. № 3. С. 47–52.
- Черных Е.П., Первышина Г.Г., Гоголева О.В. Экологическая оценка влияния автотранспорта на флуктуирующую асимметрию листьев черемухи обыкновенной (*Padus avium* Mill.) // Вестник КрасГАУ. 2013. № 12. С. 137–141.
- Чистякова Е.К., Кряжева Н.Г. Возможность использования показателей стабильности развития и фотосинтетической активности для исследования состояний природных популяций растений на примере березы повислой // Онтогенез. 2001. Т. 32, № 6. С. 422–427.
- Чубинишвили А.Т. Оценка стабильности развития и цитогенетического гомеостаза в популяциях европейских зеленых лягушек (комплекс *Rana esculenta*) в естественных и антропогенных условиях // Онтогенез. 2001. Т. 32. № 6. С. 434–439.
- Шабалина О.М., Демьяненко Т.Н. Оценка влияния загрязнения среды и почвенных факторов на показатели флуктуирующей асимметрии листа березы повислой (*Betula pendula* Roth.) в г. Красноярске // Вестник КрасГАУ. 2011. № 12. С. 134–139.
- Шадрина Е.Г., Вольперт Я.Л., Данилов В.А., Шадрин Д.Я. Биоиндикация воздействия горнодобывающей промышленности на наземные экосистемы Севера (морфогенетический подход). Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 2003. 110 с.
- Шадрина Е.Г., Вольперт Я.Л. Нарушения стабильности развития организма как результат пессимизации среды при техногенной трансформации природных ландшафтов // Онтогенез. 2014. Т. 45. № 3. С. 151–161.
- Шадрина Е.Г., Вольперт Я.Л. Опыт применения показателей флуктуирующей асимметрии растений и животных для оценки качества среды в наземных экосистемах: результаты 20-летних исследований природных и антропогенно трансформированных территорий // Онтогенез. 2018. Т. 49. № 1. С. 27–40.
<https://doi.org/10.7868/S0475145018010044>
- Шадрина Е.Г., Солдатова В.Ю. Влияние биотических и абиотических факторов на проявления флуктуирующей асимметрии в популяциях древесных растений (на примере Якутии) // Проблемы популяционной биологии: матер. XII Всерос. популяц. семинара памяти Н.В. Глотова, 11–14 апреля 2017 г., г. Йошкар-Ола. Йошкар-Ола, 2017. С. 260–262.
- Cuevas-Reyes P., Canché-Delgado A., Maldonado-López Yu., Fernandes G.W., Oyama K., González-Rodríguez A. Patterns of herbivory and leaf morphology in two Mexican hybrid oak complexes: Importance of fluctuating asymmetry as indicator of environmental stress in hybrid plants // Ecological Indicators. 2018. V. 90. P. 164–170.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.03.009>
- Hagen S.B., Ims R.A., Yoccoz N.G., Sørlibraten O. Fluctuating asymmetry as an indicator of elevation stress and distribution limits in mountain birch (*Betula pubescens*) // Plant Ecol. 2008. V. 195(2). P. 157–163.
<https://doi.org/10.1007/s11258-007-9312-y>
- Hagen S.B., Folstad I., Jakobsen S.W. Autumn colouration and herbivore resistance in mountain birch (*Betula pubescens*) // Ecology Letters. 2003. V. 6. P. 807–811.
<https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2003.00496.x>
- Palmer R.A., Strobeck C. Fluctuating asymmetry: A measurement, analysis, patterns // Annu. Rev. Ecol. Syst. 1986. V. 17. P. 391–421.
- Parsons P.A. Fluctuating asymmetry: A biological monitor of environmental and genomic stress // Heredity. 1992. V. 68. P. 361–364.
- Parsons P.A. Fluctuating asymmetry: An epigenetic measure of stress // Biol. Rev. 1990. V. 65. P. 131–145.
- Santos J.C., Alves-Silva E., Cornelissen T.G., Fernandes G.W. The effect of fluctuating asymmetry and leaf nutrients on gall abundance and survivorship // Basic and Applied Ecology. 2013. V. 14. P. 489–495.
<https://doi.org/10.1016/j.baae.2013.06.005>
- Shadrina E., Volpert Ya. Fluctuating Asymmetry of Cranio-logical Features of Small Mammals as a Reflection of Heterogeneity of Natural Populations // Symmetry.

2016. 8. 142.
<https://doi.org/10.3390/sym8120142>
- Shadrina E., Turmukhametova N., Soldatova V., Vol'pert Ya., Korotchenko I., Pervyshina G.* Fluctuating Asymmetry in Morphological Characteristics of *Betula Pendula* Roth Leaf under Conditions of Urban Ecosystems: Evaluation of the Multi-Factor Negative Impact // *Symmetry*. 2020. V. 12. P. 1317.
<https://doi.org/10.3390/sym12081317>
- Turmukhametova N., Shadrina E.* Changes in the Fluctuating Asymmetry of the Leaf and Reproductive Capacity of *Betula pendula* Roth Reflect Pessimization of Anthropogenically Transformed Environment // *Symmetry*. 2020. V. 12(12). P. 1–18.
<https://doi.org/10.3390/sym12121970>
- Turmukhametova N.V., Shadrina E.G., Soldatova V.Yu., Ivantsova E.N.* Fluctuating asymmetry of the lamina of *Betula pendula* Roth in the context of different cities and industrial load // *AGRITech-V-2021 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021. V. 839. P. 052011.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/5/052011>
- Wilsey B.J., Haukioja E., Koricheva J., Sulkioja M.* Leaf fluctuating asymmetry increases with Hybridization and elevation in tree-line birches // *Ecology*. V. 79(6). 1998. P. 2092–2099.
- Zakharov V.M., Shadrina E.G., Trofimov I.E.* Fluctuating Asymmetry, Developmental Noise and Developmental Stability: Future Prospects for the Population Developmental Biology Approach // *Symmetry*. 2020. V. 12. P. 1376.
<https://doi.org/10.3390/sym12081376>

Assessment of the Health of the Environment by the Value of Fluctuating Asymmetry of Woody Plants: Analysis of Possible Causes of the Distortion of the Results

E. G. Shadrina^{1, #} and V. Yu. Soldatova²

¹ *Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, pr. Lenina, 41, Yakutsk, 677980 Russia*

² *North-Eastern Federal University, Belinskogo, 58, Yakutsk, 677000 Russia*

[#]*e-mail: e-shadrina@yandex.ru*

The reasons for distortion of the results of assessment of fluctuating asymmetry of woody plants are examined by the example of the silver birch *Betula pendula* Roth. The results of fluctuating asymmetry assessment by researchers with different skill levels in using this method are presented; it is shown that for researchers without any experience in using the method it is typical to overestimate the results to 50%, while training provides similar results. When assessing environmental health by the magnitude of fluctuating asymmetry, it is necessary to comply with the method requirements for material collection and processing; non-compliance can lead to problems with the interpretation of the results.

Keywords: fluctuating asymmetry, development stability, silver birch, *Betula pendula*, environmental quality, bioindication