

УДК [581.5+591.5]:574

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФЛУКТУИРУЮЩЕЙ АСИММЕТРИИ РАСТЕНИЙ И ЖИВОТНЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СРЕДЫ В НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ: РЕЗУЛЬТАТЫ 20-ЛЕТНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННО ТРАНСФОРМИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

© 2018 г. Е. Г. Шадрина^{1*}, Я. Л. Вольперт²

¹Институт биологических проблем криолитозоны Сибирского отделения Российской академии наук
677000 Якутск, пр. Ленина, д. 41

²Научно-исследовательский институт прикладной экологии Севера
Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова
677000 Якутск, пр. Ленина, 1

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

Поступила в редакцию 22.06.2017 г.

Величина флуктуирующей асимметрии (ФА) древесных растений и мелких млекопитающих рассматривается как показатель нарушения стабильности развития организма. В качестве антропогенно трансформированных анализируются городские территории с рекреационной зоной, участки с повышенным радиационным фоном, зона воздействия предприятий горнодобывающей промышленности. Объекты исследования – древесные растения – березы плосколистная (*Betula platyphylla*), растопыренная (*Betula divaricata*), тощая (*Betula exilis*), ольховник кустарниковый (*Duschekia fruticosa*), ива корзиночная (*Salix viminalis*) и мелкие млекопитающие – красная полевка (*Clethrionomys rutilus*), полевка-экономка (*Microtus oeconomus*), средняя (*Sorex caecutiens*) и тундрная (*S. tundrensis*) бурозубки. Промерено около 60 000 листьев, просмотрено 3 500 черепов мелких млекопитающих. Обсуждаются вопросы выбора видов-биоиндикаторов, а также факторы, которые могут исказить результаты при оценке качества среды по показателям нарушения стабильности развития. На городских территориях отмечается статистически значимое повышение ФА растений по сравнению с природными биотопами. Выявлена положительная корреляция между величиной ФА и автотранспортной нагрузкой, содержанием тяжелых металлов в почве и загрязнением атмосферного воздуха. Отмечено влияние на показатель ФА близости к проезжей части дороги и состояния дорожного покрытия. На территории административного центра (г. Якутск) основным источником загрязнения является автотранспорт, вследствие чего наиболее загрязнены крупные улицы и перекрестки с высокой транспортной нагрузкой. На территории промышленного центра (г. Мирный) загрязнение распространяется от техногенно нарушенных земель на жилую зону. На территории малого административного центра (г. Алдан) основным источником загрязнения служит федеральная автотрасса. В зоне воздействия горнодобывающей промышленности рекомендуется использовать параллельно показатели ФА растений и животных. Для отрасли характерно отторжение больших площадей природных ландшафтов, при этом трансформированные участки чередуются со слабо затронутыми. Обсуждается специфика воздействия алмазо-, золото- угледобывающей промышленности и разработки месторождений нефти и газа, что необходимо учитывать при отборе проб на биоиндикацию. Затруднение биоиндикации при полном уничтожении почвенного и растительного покрова предлагается преодолеть использованием методов биотестирования путем оценки всхожести семян и частоты патологий митоза у лука-батунна. Отмечено повышение уровня ФА древесных растений и мелких млекопитающих в зоне воздействия добывающей промышленности, на участках с хронически повышенным радиационным фоном и загрязненных нефтепродуктами вследствие техногенной аварии. Применение показателей ФА позволяет дать оценку качества среды и сравнить состояние территорий, находящихся в разных природно-климатических условиях, сопоставление которых затруднено из-за многокомпонентных, неодинаковых по силе и разным по генезису антропогенных воздействий.

Ключевые слова: стабильность развития, флуктуирующая асимметрия, биоиндикация, биотестирование, береза плосколистная, мелкие млекопитающие, урбанизированная территория, горнодобывающая промышленность

DOI: 10.7868/S0475145018010044

ВВЕДЕНИЕ

Способность к поддержанию гомеостаза развития является одной из базовых характеристик организма. Ранее проведенными исследованиями было показано, что высокая стабильность развития обеспечивается генетической коадаптацией генома при оптимальных условиях развития (Захаров, 1987; *Developmental stability...*, 1992; *Developmental homeostasis...*, 1997). При оценке стабильности развития одним из удобных показателей является уровень онтогенетического шума, оцениваемого по уровню флуктуирующей асимметрии (ФА), которая представляет собой мелкие ненаправленные отклонения от идеального симметричного состояния, не имеющие самостоятельного адаптивного значения и возникающие как результат случайных ошибок в ходе онтогенеза, прежде всего – пренатального (Захаров, 1987; Leary, Allendorf, 1989). Ранее неоднократно указывалось, что уровень такого рода мелких ошибок развития при нормальных условиях невысок, но возрастает при любом стрессирующем воздействии, что и приводит к повышению асимметрии (Захаров, 1987; Parsons, 1990, 1992; Palmer, Strobeck, 1992). Считается, что фенотипические различия такого рода не оказывают ощутимого влияния на жизнеспособность индивида (Захаров, 1987; Palmer, Strobeck, 1992; Захаров и др., 2001а), и дестабилизация развития является высокочувствительным критерием, отражающим онтогенетические изменения в ответ на ухудшение условий среды в период органогенеза.

Оценка величины ФА лежит в основе морфогенетического подхода в биоиндикации, предложенного В.М. Захаровым (1987), в последнее время получающим все большее признание и широкое распространение как один из наиболее удобных методов, удачно интерпретирующий качество среды через оценку состояния индивидов.

Для оценки антропогенного воздействия возможно применение самых разных подходов – от ценологических и популяционных до молекулярно-генетических и клеточных, но отнюдь не все из них можно использовать в реальной практике. Прежде всего, надо отметить, что биоиндикация с целью оценки качества среды предусматривает создание достаточно четкой градации анализируемых признаков и создание шкалы для унификации данных. Поэтому важна возможность выделения у тест-организмов четко диагностируемых признаков с определением степени отклонения от оптимума. Немаловажны также высокая чувствительность тестируемых признаков при низкой индивидуальной изменчивости, возможность быстрой обработки достаточно большого объема материала, воспроизводимость результатов, полученных при использовании тест-системы разными

исследователями, и, в идеале, возможность сравнения с другими регионами (Шадрина, Вольперт, 2017).

В условиях усиливающегося антропогенного воздействия достаточно большое число исследований посвящено анализу изменений ценологических, популяционных, онтогенетических и молекулярно-генетических параметров у растений и животных. В городах и промышленных центрах часто наблюдается изменение показателей анатомической структуры мезофилла листа, снижение жизнеспособности пыльцы, нарушения в строении вегетативных органов, некрозы (Кулагин, 1974; Мэннинг, Федер, 1985; Вайнерт и др., 1988; Николаевский, 1999; Лабутина и др., 2005; Турмухаметова, 2005), происходят изменения в строении фотосинтезирующих клеток и физиолого-биохимических параметров (Илькун, 1971; Кунин и др., 1979; Шеин и др., 2014). Выявлено изменение демографической структуры популяций и репродуктивных параметров растений в неблагоприятных условиях обитания (Жуйкова и др., 2001, 2002; Ишмуратова, Зайнагабдинова, 2005; Шадрина, Шилев, 2009). Вблизи промышленных предприятий наблюдается изменение состава и структуры фитоценозов за счет исчезновения чувствительных к загрязнению видов и преимущественного размножения рудеральных, вследствие этого образуются растительные сообщества, ограниченные двумя-тремя видами; особенно ярко техногенные нарушения проявляются в нарушении фитоценозов в условиях Севера (Захарова, 2000; Миронова, 2000; Жуйкова, Мордвина, 2003). Для животных, на примере мелких млекопитающих, можно также отметить изменения показателей видового разнообразия, состава и структуры сообществ, повышение смертности и, как следствие, изменения демографической структуры и интенсивности репродукции (Егоров, Вольперт, 1996; Вольперт, Сапожников, 1998; Лукьянова, Лукьянов, 1998а, б; Таскаев, Тестов, 1999; Шилова, 1999; Шадрина, Вольперт, 2004; Вольперт и др., 2005; Петров, 2007; Мухачева и др., 2012; Шадрина и др., 2014). Нами было показано, что на техногенно трансформированных участках отмечено сочетание повышения индивидуальной плодовитости животных с повышением частоты нарушений беременности, что свидетельствует о наличии глубоких изменений на уровне популяции (Шадрина, Вольперт, 2004, 2014).

При этом надо отметить, что ни для одного из перечисленных методов и подходов не было создано шкалы, которая позволила бы формализовать данные и ранжировать результаты, полученные в разные годы, в разных регионах и при разных техногенных нагрузках. Это связано с неоднозначностью реакции биоты на антропогенное воздействие, в частности известно, что реакция многих видов на загрязнение среды подвержена

существенным индивидуальным колебаниям (Прокопьев и др., 2002; Журавская и др., 2009), а фрагментация местообитаний может способствовать повышению показателей видового разнообразия по сравнению с природными биотопами (Вольперт и др., 2005). Ранжирование семенной продуктивности у растений, индивидуальной плодовитости и демографической структуры популяций у животных вообще невозможны ввиду существенных возрастных, популяционных и географических различий даже в природных биотопах.

В свете вышеперечисленного, шкала оценки качества (здоровья) среды, разработанная В.М. Захаровым с соавторами (2000а) на основе градации показателей ФА растений и животных, представляет немалый интерес благодаря удобству применения, универсальности и получению достаточно четких результатов при условии соблюдения методики работы. Именно поэтому в последнее время число работ этого направления биоиндикации неуклонно растет.

При оценке антропогенного воздействия по показателям ФА наиболее часто используются растения благодаря доступности и скорости сбора материала, а основное внимание уделяется качеству городской среды и окрестностям промышленных предприятий. Такого рода работы проводились на территории гг. Москвы, Воронежа, Нижнего Новгорода, Калуги и Калужской области, Саратова, Читы, Томска, Астрахани, Наро-Фоминска, Нижнего Тагила, Нижнего Новгорода, Якутска, Мирного, Алдана, Ханты-Мансийска (Кряжева и др., 1996; Стрельцов и др., 1997; Мокров, Гелашвили, 1999; Захаров и др., 2000б; Захаров и др., 2001в; Константинов, 2001; Шержукова и др., 2002; Дружкина и др., 2007; Семенова и др., 2007; Дударь и др., 2008; Солдатова, Шадрина, 2007; Солдатова и др., 2009; Гуртяк, Углев, 2010; Жуйкова, 2010; Шабалина, Демьяненко, 2011; Звягинцева, 2012; Савинцева и др., 2012; Трубина и др., 2013; Луцкан, Шадрина, 2013; Shadrina et al., 2014; Ерофеева, 2015; Шадрина, Луцкан, 2016; Шадрина и др., 2016; Турмухаметова, Сухоруков, 2017). Относительно небольшое число работ посвящено анализу влияния ионизирующей радиации на стабильность развития растений и животных (Последствия Чернобыльской..., 1996; Шадрина и др., 2008). В значительно меньшей степени изучено воздействие предприятий горнодобывающей промышленности (Данилов и др., 2001; Шадрина и др., 2003, 2009, 2012а, б). Кроме того, имеется все более расширяющийся круг работ, посвященных оценке состояния природных популяций растений и на особо охраняемых природных территориях (Мокров, Малова, 1999; Захаров и др., 2001б; Булатова и др., 2009).

Целью данной работы было сравнение влияния разных по генезису антропогенных воздействий

на показатели ФА растений и животных, а также анализ достоинств и слабых мест методики и возможных причин ее неудачного применения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материал для исследования был собран в 1996–2016 гг. на территории Якутии. Обследовались природные биотопы, территория трех городов, участки в зоне воздействия предприятий угле-, золото-, алмазодобывающей промышленности, с хронически повышенным радиационным фоном, загрязненные нефтью и нефтепродуктами. В качестве модельных групп для оценки состояния наземных экосистем рассматриваются древесные растения и мелкие млекопитающие (насекомоядные и грызуны). Таким образом, оценка стабильности развития проведена для трех трофических уровней экосистем – продуцентов и консументов I и II порядков.

Величину показателя флуктуирующей асимметрии оценивали по методике, предложенной В.М. Захаровым с соавторами (Захаров и др., 2000а). Для растений показатель ФА определяли по признакам строения и жилкования листовой пластинки. Выбраны виды, широко распространенные в районе исследований – ольховник кустарниковый (*Duschekia fruticosa*), ива корзиночная (*Salix viminalis*), береза плосколистная (*Betula platyphylla*), береза растопыренная (*Betula divaricata*), береза тощая (*Betula exilis*). Величина флуктуирующей асимметрии у растений оценивались с помощью интегрального показателя – величины среднего относительного различия на признак (среднего арифметического отношения разности к сумме промеров листа слева и справа, отнесенные к числу признаков) по формуле:

$$FA = ABS \frac{(L - R)}{(L + R)},$$

где: FA – интегральный показатель флуктуирующей асимметрии, ABS – абсолютная величина, L – значение признака на левой, R – на правой стороне листа.

Для березы плосколистной использована схема промеров, предложенная В.М. Захаровым с соавторами (2000а), для остальных видов методика модифицирована нами (Шадрина и др., 2003). Собранные листья фиксировали в 50°-м спирте и сканировали. Измерения проводили с помощью компьютерных программ, линейные промеры с точностью до 0.1 мм, угловые – с точностью до 0.1°.

Показатель ФА мелких млекопитающих определяли путем подсчета отверстий для нервов и кровеносных сосудов на черепе (Захаров и др., 2000а). Выраженность ФА на уровне индивида оценивали как частоту асимметричного проявления признака,

представляющую собой долю асимметричных признаков от общего числа исследованных. Для популяционной характеристики использовали среднее арифметическое значение показателя. При статистической обработке материала использовали общепринятые приемы. ФА вычисляли для массовых видов – красная полевка (*Clethrionomys rutilus*), полевка-экономка (*Microtus oeconomus*), средняя (*Sorex caecutiens*) и тундряная (*S. tundrensis*) буро-зубки. Всего за период исследования просмотрено более 3 500 черепов мелких млекопитающих, промерено более 60 000 листьев древесных растений. В ряде случаев для оценки загрязнения почвенного покрова проводили биотестирование почв по показателям всхожести и частоте патологий митоза лука-батуна (*Allium fistulosum* L.), проанализировано 84 пробы почвы, около 30 000 анателофазных пластинок (Куринный, 1985; Блиновский и др., 1992; Довгалюк и др., 2001).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Показатели нарушения стабильности развития организмов в природных биотопах как основа для получения фоновых показателей при оценке здоровья среды

Предыдущими исследованиями доказано, что показатель ФА, предложенный В.М. Захаровым, можно использовать как базовую характеристику организма, характеризующую способность к поддержанию гомеостаза развития на определенном уровне, на чем и основана предложенная балльная шкала. Однако существует целый ряд факторов, которые могут негативно повлиять на стабильность развития, как в природных популяциях, так и в условиях техногенного воздействия, усиливая нарушения, обусловленные загрязнением. Наши исследования на территории Якутии показали, что в природных ненарушенных ценозах с хорошей освещенностью показатель ФА березы плосколистной составляет около 0.034–0.044, что соответствует аналогичным показателям березы повислой для европейской части РФ (Захаров и др., 2000б). Это свидетельствует о том, что в норме на большей части ареала вида при благоприятных условиях обеспечивается поддержание гомеостаза развития в пределах видовой нормы (Захаров и др., 2001а, б; Шадрина и др., 2003). Для ольховника кустарникового этот показатель составляет 0.044–0.05, ивы корзиночной – 0.035–0.04, березы тощей – 0.030–0.034 (Шадрина и др., 2003; Шадрина, Вольперт, 2014). При этом надо отметить, что для растений величина показателя ФА остается в пределах видовой нормы лишь в условиях, близких к оптимальным: повышение уровня флуктуирующей асимметрии отмечено нами не только на северной периферии ареала, но и при

ухудшении освещенности (особенно для березы плосколистной), переувлажнения, на обедненных почвах, а также в условиях межвидовой конкуренции с хвойными (Шадрина, Вольперт, 2014; Шадрина, Солдатова, 2017).

Для мелких млекопитающих частота асимметричных проявлений варьирует в значительных пределах: у полевок в природных биотопах при благоприятных условиях она составляет около 0.3–0.35, у землероек – 0.18–0.2 (Шадрина и др., 2003; Shadrina, Vol'pert, 2016). Для наиболее массовых видов можно отметить достаточно сходные показатели ФА в пределах обширной территории таежной зоны (Shadrina, Vol'pert, 2016). Для большинства видов таежных грызунов и насекомых повышение частоты асимметричных проявлений отмечено в лесотундре, а также при продвижении в горы, что связано с эффектом поясности. Так, у красной полевки и средней буро-зубки в горах Верхоянья повышение частоты нарушений стабильности развития отмечается на высотах свыше 800–1000 м н.у.м. (Shadrina, Vol'pert, 2016).

Оценка состояния природных популяций растений и животных осложняется возможными повышениями уровня ФА в результате воздействия разных абиотических и биотических факторов. У растений это, прежде всего, климатические факторы (Жуйкова, 2010; Захаров и др., 2011; Ерофеева, 2015). У животных экспериментально доказано, что потомство социально стрессированных самок отличается повышенными показателями ФА (Valetsky et al., 1997; Шадрина, Николаева, 2006). Показано, что в природе эта зависимость обусловлена фазой динамики численности (Захаров и др., 1984; Zakharov et al., 1997).

Таким образом, при оценке антропогенного воздействия, с одной стороны, совершенно необходимо в каждом отдельном случае осуществлять сбор материала в природных ненарушенных ценозах для обеспечения контроля при оценке степени трансформации среды, с другой стороны, – для правильной интерпретации результатов необходим тщательный анализ контрольных выборок для исключения влияния природных факторов, не связанных с техногенезом.

Помимо перечисленных объективных факторов природного характера, исказить результаты в сторону повышения уровня ФА могут субъективные факторы при условии неполного соблюдения методики отбора материала для исследования. Так, согласно методике, сбор листьев следует проводить с растений генеративного возраста. Нами проведено сравнительное исследование шести возрастных групп от корневой поросли до перестойных деревьев. 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 поросли с очень крупными листьями. Перестойные деревья характеризовались показателем ФА свыше 0.06 независимо от размеров листьев (Шадрина, Солдатова, 2017).

Кроме того, проведен анализ влияния болезней и вредителей. С этой целью был проведен сбор материала с деревьев, пораженных листогрызущими насекомыми и грибковыми заболеваниями листьев. Для пораженных листьев показатель ФА варьировал в пределах 0.05–0.061, для контрольных – 0.046–0.047, причем отмечена прямая зависимость от степени повреждения (коэффициент ранговой корреляции Спирмена для степени повреждения 0.92; $p < 0.05$), и в целом нарушения ФА более выражены при грибковых поражениях (коэффициент Спирмена 0.89; $p < 0.05$). Сходные закономерности выявлены для ивы корзиночной и черемухи обыкновенной при повреждении галлообразующими насекомыми и клещами. Регрессионный анализ совокупности данных по трем видам показал, что основной вклад в повышение показателя ФА вносит степень повреждения и деформации листовой пластинки (Шадрина, Солдатова, 2017). Таким образом, собирая листья в антропогенных биотопах с деревьев, пораженных вредителями, перестойных или очень молодых, мы оцениваем не качество среды, а суммарное негативное воздействие на данное растение.

Нарушения стабильности развития организма на территории трех северных городов

Для селитебных территорий в целом характерно одновременное действие множества экологических факторов, и только использование методов биоиндикации позволяет оценить суммарное негативное воздействие на организм и экосистему. Нами обследована территория трех городов на территории Якутии с разной численностью и структурой населения. Город Якутск является административным центром Республики Саха Якутия, расположен в долине Средней Лены. Основными источниками загрязнения являются автотранспорт, теплоэнергетика, строительная индустрия, население более 300 тыс. человек. Город Мирный находится на территории Западной Якутии, население около 40 тыс. человек, это центр алмазодобывающей промышленности, его территория включает жилые районы, а также промышленную зону Мирнинского горно-обогатительного комбината. Вплотную к территории города подходят участки горных разработок, в том числе отвалы пустых пород. Город Алдан является административным центром Алданского района (Южная Якутия) – старейшего в Якутии региона золотодобычи, население около 27 тыс. человек; непосредственно на территории города крупные промышленные предприятия

отсутствуют. Он расположен южнее двух первых, и в силу специфики рудного поля характеризуется достаточно сложным геохимическим фоном.

На территории г. Якутска отмечен значительный разброс значений показателя ФА березы плосколистной – от 0.043 до 0.057, а усредненные показатели варьировали от 0.048 до 0.051, что может зависеть как от антропогенного воздействия, так и от погодных условий (Солдатова, Шадрина, 2016), но при этом в целом для всех лет исследования на территории города были неизменно выше, чем в рекреационной зоне. Поскольку основным источником загрязнения на территории города Якутска является автотранспорт, проведен анализ зависимости стабильности развития березы плосколистной от интенсивности движения автотранспорта на примере 12 точек в черте города. Транспортная нагрузка в указанный период варьировала в пределах от 600 до 1900 автомашин в час. Выявлена статистически значимая корреляционная зависимость между показателем ФА и транспортной нагрузкой (коэффициент корреляции Спирмена 0.76; $p < 0.01$). Изменчивость показателя ФА в зависимости от интенсивности движения автотранспорта мы наблюдали на примере одной точки в центре г. Якутска в течение двух лет (перекресток улиц). В первый год наблюдения показатель ФА составила 0.055, что показывает критическое состояние среды, а на следующий год в связи с ремонтом одна из улиц была перекрыта, березы были заслонены от улиц деревянным забором, и показатель ФА снизился до 0.045. В зависимости от интенсивности транспортной нагрузки мы разбили территорию города на три зоны – интенсивного, умеренного и слабого антропогенного воздействия. Показатель ФА березы плосколистной по 1–2 зонам отличается от контрольного биотопа с высокой степенью статистической значимости, тогда как величина ФА у берез, растущих в зоне слабого воздействия, фактически такая же, как у деревьев, растущих в природных биотопах и в рекреационной зоне.

Анализ показателей ФА березы плосколистной на территории г. Мирный и в его окрестностях также выявил существенные различия в величине интегрального показателя между разными точками. Величина 0.044, характерная для контрольной точки, является свидетельством достаточно благоприятных условий существования, тогда как в биотопах, затронутых техногенным воздействием, наблюдается повышение этого показателя. Наиболее значительные нарушения стабильности развития отмечены у берез, подвергающихся непосредственному химическому и пылевому воздействию на территории промышленных объектов, многие из них угнетены, а величина интегрального показателя составляет 0.048–0.054. Наиболее сильно выраженной асимметрией характеризуются листья берез, растущих вдоль дороги на территории карьера,

этот показатель статистически значимо выше, чем на контрольной территории ($p < 0.001$). Ранее при комплексной оценке качества среды на территории г. Мирного по широкому кругу биоиндикационных и геохимических показателей нами совместно с соавторами было выявлено, что качество городской среды в пределах г. Мирного ухудшается от центра к периферии (Вольперт и др., 2005а), что в целом нехарактерно для урбанизированных территорий. Анализ эколого-геохимических данных показал, что основным путем, с которым происходит загрязнение городской территории, является атмосфера, причем в данном случае автомобильные выбросы не играют определяющей роли. Судя по составу и характеру распределения микроэлементов в пределах жилой зоны, основной вклад в загрязнение вносят территории, нарушенные в процессе добычи алмазов – это отвалы пустых пород и хвостохранилища.

Город Алдан. Для исследованной территории в целом характерны относительно высокие показатели ФА (0.046–0.061), соответствующие III–V баллам качества среды по шкале В.М. Захарова с соавторами (2000а), что свидетельствует о неблагоприятном состоянии среды. Ранее уже высказывалось мнение, что высокие показатели ФА на территории Алданского района могут быть связаны с длительным антропогенным воздействием, в частности золотодобывающей промышленности, относительно высоким радиационным фоном, местной геохимической спецификой территории (Шадрин и др., 2003). Относительно низкие показатели ФА характерны для южной и юго-западной частей города, которые характеризуются высокой степенью озеленения и примыкают к ненарушенному лесному массиву (Луцкан, Шадрин, 2013). При сопоставлении показателей ФА березы плосколистной с данными по загрязнению атмосферного воздуха Центра гигиены и эпидемиологии по Республике Саха (Якутия) выявлена зависимость от загрязнения взвешенными веществами, т.е. пылью (Шадрин, Луцкан, 2016). Для территории г. Алдана не выявлено четкой зависимости от автотранспортной нагрузки, наиболее значительное повышение показателя ФА березы плосколистной отмечено вдоль федеральной автотрассы и в непосредственной близости от проезжей части улиц с гравийным покрытием.

Ранее нами была отмечена зависимость нарушений гомеостаза развития от близости к проезжей части дорог (Солдатова, Шадрин, 2007). Даже в центре г. Якутска в зависимости от удаленности от дороги, а также от открытости местности показатель ФА варьирует (рис. 1), для г. Алдана эта зависимость также отмечена, причем прослеживается зависимость от состояния дорожного покрытия, которое и определяет пыление от автотранспорта.

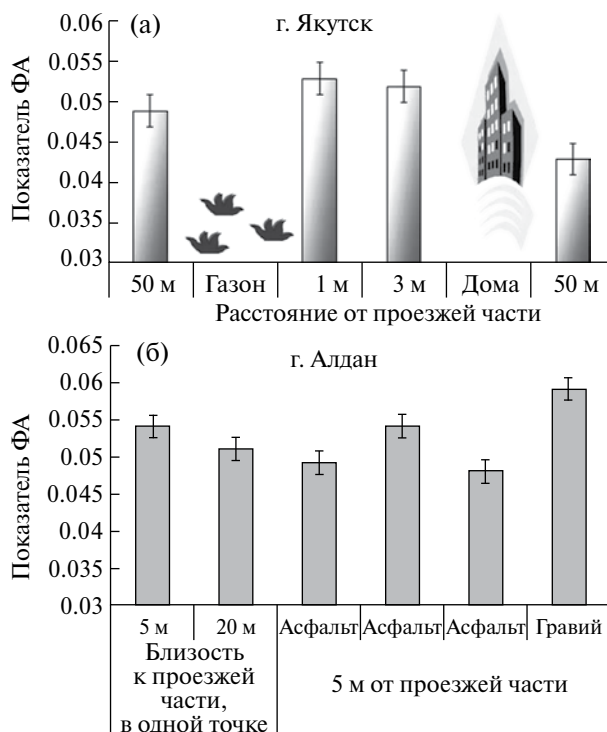


Рис. 1. Зависимость показателя стабильности развития березы плосколистной на территории гг. Якутска и Алдана от качества дорожного покрытия и близости к проезжей части дороги. Показатель ФА – интегральный показатель флуктуирующей асимметрии: среднее относительное различие между сторонами по пяти промерам листа.

При этом надо отметить, что эта зависимость хорошо прослеживается в пределах административных центров и не выражена на территории г. Мирный.

На основании полученных данных нами составлены карты здоровья среды территории трех городов (рис. 2). Как видно из представленных карт, для территории г. Якутска загрязнение распространяется от центра города к окраинам, что связано с интенсивностью движения автотранспорта, на территории г. Мирный – наоборот, загрязнение происходит от промышленных окраин к центру города, на территории г. Алдан четкой закономерности распределения загрязнения не выявлено.

Нарушения стабильности развития в зоне влияния добывающей промышленности

Необходимо учитывать специфику деятельности разных отраслей. Золотодобывающая промышленность в Южной Якутии в основном представлена разработкой россыпных месторождений и, как следствие, основное воздействие приходится на долины мелких рек, создание дражных отвалов, от которых запыление распространяется на прилегающие территории. Добыча алмазов до последнего

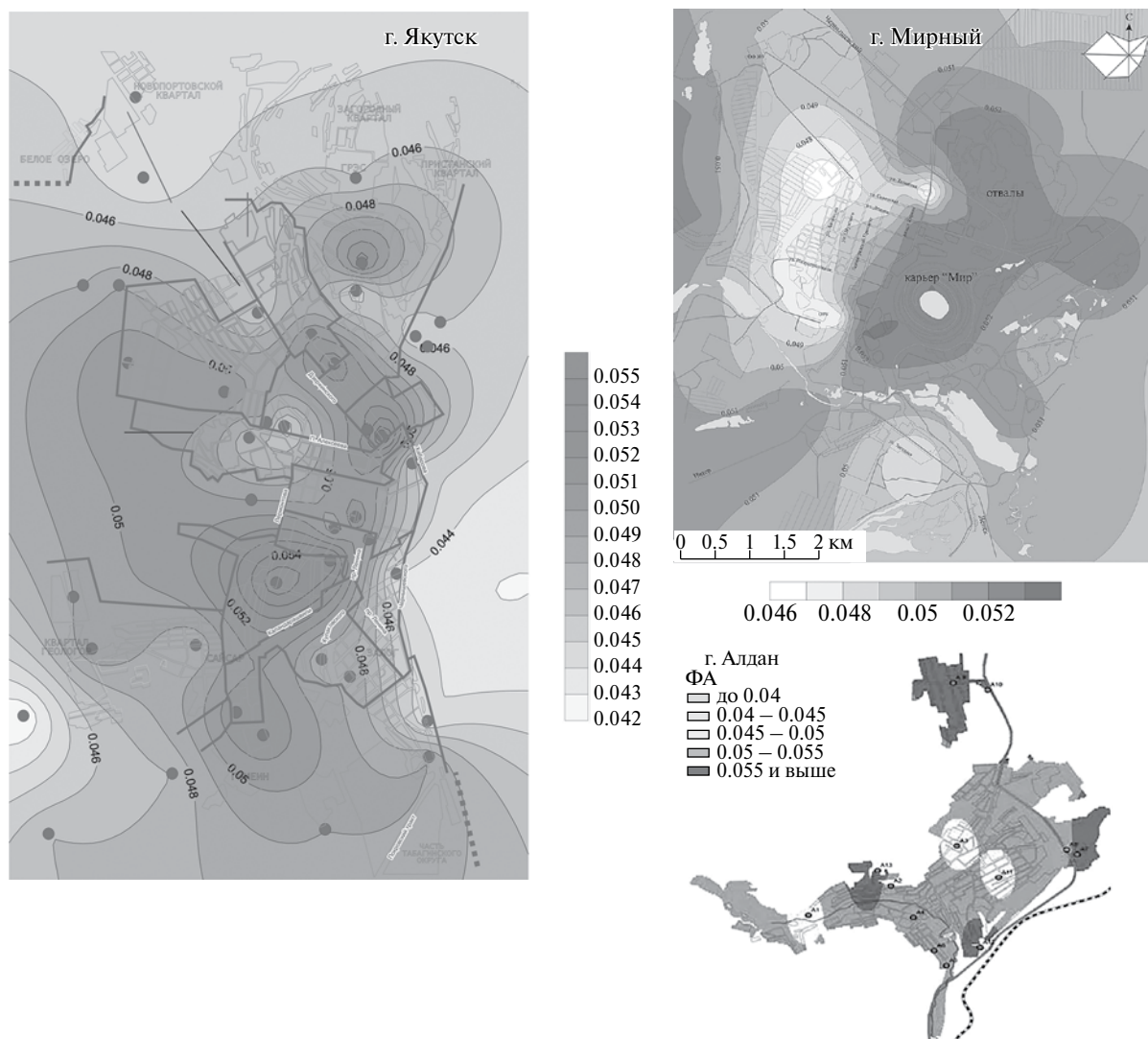


Рис. 2. Карты здоровья среды трех северных городов (см текст).

времени осуществлялась путем открытой разработки и характеризуется наибольшими масштабами прямой трансформации и опосредованного воздействия на наземные экосистемы. Негативное влияние на окружающую среду оказывают создание карьеров, дражных полигонов, отвалов, обогатительных фабрик, хвостохранилищ, — все эти предприятия рассеяны по большой территории, на которой полностью или частично трансформированные участки перемежаются с незатронутыми. Угледобывающая промышленность при открытом способе добычи также характеризуется карьерной разработкой месторождений в сочетании с взрывными работами и характеризуется наибольшим загрязнением местности в результате взрывов (Шадрина и др., 2003, 2009). Разработка месторождений углеводородного сырья при соблюдении норм природоохранного законодательства характеризуется локальным воздействием на площадках буровых

скважин и созданием линейных сооружений, здесь ухудшение качества среды связано с загрязнением углеводородами и буровыми растворами.

В целом в зоне воздействия предприятий добывающей промышленности нарушения стабильности развития отмечены для всех исследованных видов растений и животных и на всех территориях, подверженных той или иной степени трансформации или опосредованного воздействия, но наиболее значительные повышения уровня ФА наблюдаются в непосредственной близости от карьеров, а также на участках, загрязнение которых связано с особенностями рельефа или климата местности — в пойме рек, куда может происходить смыв пыли, а также на повышениях рельефа по направлению господствующих ветров. При этом надо отметить, что в зоне воздействия старейшей отрасли Якутии — золотодобывающей промышленности — существенной трансформации подвержены значительные площади природных

ландшафтов Южной Якутии, где повышение частоты нарушений стабильности развития наблюдается даже в биотопах, не подверженных прямому техногенному влиянию, а в случае, когда на общий высокий уровень антропогенного пресса накладываются последствия прямой трансформации, они еще больше повышаются. Причем амплитуда колебаний ЧАП по годам у мелких млекопитающих на посттехногенных территориях была значительно выше, чем в контрольных. Не исключено, что животные, обитающие на трансформированных участках, значительно резче реагируют на изменения условий существования (климатические факторы, внутривидовые отношения), чем обитающие в более благоприятных условиях (Шадрина и др., 2003). Изменения показателей ФА в градиенте условий среды прослеживаются при интенсивном загрязнении, например, при открытой добыче каменного угля в окрестностях карьеров (Шадрина и др., 2009; Шадрина, Вольперт, 2014).

Наиболее сложна оценка качества среды при оценке деятельности нефте- и газодобывающей промышленности, т.к. на площадках скважин регулярно удаляется древесная растительность, по этой же причине здесь крайне маловероятно образование оседлого населения мелких млекопитающих. На окраинах площадок и в соседних биотопах показатель ФА древесных растений может варьировать от 0.043 (незначительные отклонения от нормы) до 0.05 (Шадрина и др., 2012б). Однако в случае интенсивного загрязнения оценка качества среды по показателям ФА становится невозможной из-за гибели растительности и отсутствия животного населения. В этих случаях хорошие результаты дает биотестирование образцов почвы с оценкой всхожести семян и частоты патологий митоза в корешках проростков; мы в качестве тест-объекта использовали лук-батун, а в качестве патологий рассматривали хромосомные и хроматидные мосты, одиночные и парные фрагменты, отставания и забегания хромосом на стадии ана- и телофазы (Шадрина и др., 2012б). Применение данного метода биотестирования можно использовать также при оценке состояния урбанизированных территорий в случае отсутствия древесной растительности, он удобен тем, что для него также можно создать балльную шкалу. В целом же для углеводородного загрязнения надо отметить трудность в оценке влияния на стабильность развития растений. С одной стороны, в случае аварийных разливов нефтепродуктов последствия могут проявляться на больших расстояниях, особенно при распространении загрязнения по реке (Шадрина и др., 2001), с другой стороны, – загрязнение при разработке газовых и газоконденсатных месторождений, зачастую не влияет на стабильность

развития растений и животных. Мы связываем это с летучестью данных фракций углеводородов.

В целом при разработке месторождений отторжение значительных площадей природных территорий зачастую сопровождается полным уничтожением на них почвенного и растительного покрова, а большие объемы извлекаемых пород приводят к загрязнению и даже преобразованию геохимического облика ландшафта, а при оценке влияния горнодобывающей промышленности выявление ведущего фактора, влияющего на повышение частоты нарушений стабильности затруднено из-за сложного многокомпонентного воздействия. Мы считаем, что ведущую роль играют трансформация растительного и почвенного покрова, механическое и химическое загрязнение, связанное с разливами реагентов, нефти и нефтепродуктов, пылением породы, причем в последнем случае воздействие зависит от свойств материнских пород месторождений. В частности, в зоне воздействия алмазодобывающей промышленности при оценке влияния загрязнения почвенного покрова на стабильность развития березы плосколистной нами выявлена положительная корреляционная зависимость показателя ФА от содержания водорастворимых форм кобальта и мышьяка, определяющих геохимическую специфику Накынского кимберлитового поля (Легостаева и др., 2012). Для территории Алданского района, также характеризующегося сложным геохимическим обликом наиболее высоким содержанием в почве характеризуются марганец, медь, цинк и свинец, т.е. элементы, характерные для материнских пород. Нами отмечены тесные корреляционные связи показателя ФА березы плосколистной с суммарным загрязнением верхнего слоя почвы на территории г. Алдана, и участков, примыкающих к федеральной автотрассе “Лена”, при этом для территории города основной вклад в эту зависимость вносят содержания марганец и кадмий, а для территории вдоль трассы – свинец.

Влияние ионизирующей радиации

Обследованы территории с хронически повышенным радиационным фоном (ХПРФ), и фоновые участки на территории Южной и Западной Якутии. В первом случае это территория уран-ториевого месторождения, на которой в 50-х годах проводились геологоразведочные работы, и большое количество радиоактивной породы, содержащейся в отвалах, до сих пор находится на поверхности, создавая ХПРФ от 20 до 1000 мкР/ч. Во втором случае исследования проводились в окрестностях двух подземных ядерных взрывов (ПЯВ), сопровождавшихся аварийными выбросами, уровень радиационного фона варьирует в пределах 40–190 мкР/ч. Оценка стабильности развития проводилась с применением трех видов

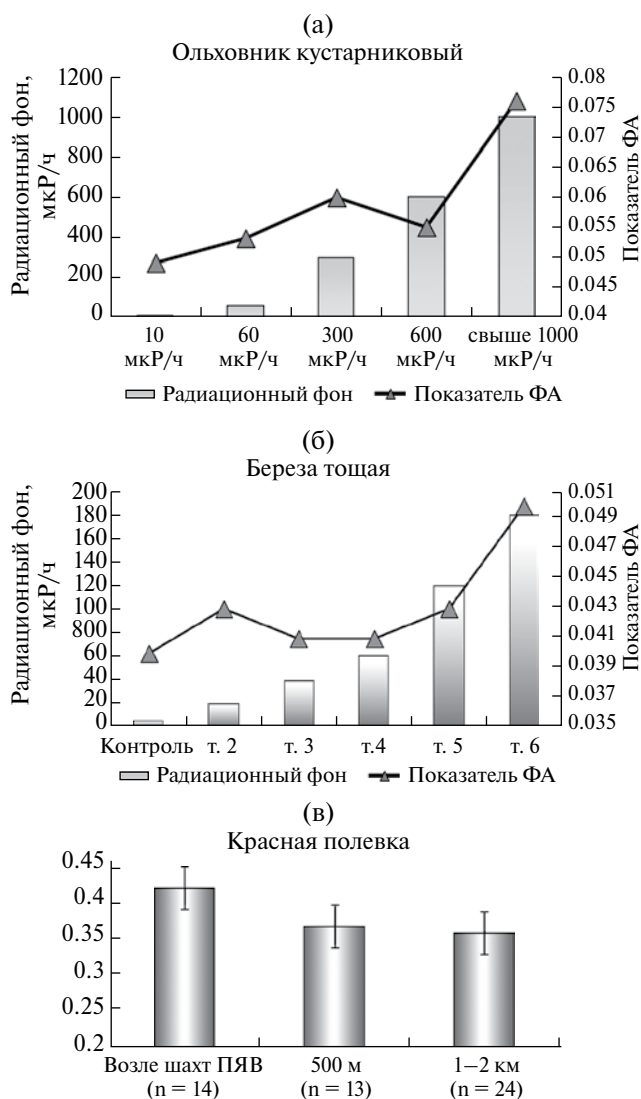


Рис. 3. Нарушения стабильности развития растений и животных (повышение показателей ФА) в условиях антропогенно повышенного радиационного фона.

Показатель ФА – интегральный показатель флуктуирующей асимметрии: среднее относительное различие между сторонами по пяти промерам листа.

ЧАП – интегральный показатель флуктуирующей асимметрии: среднее число асимметричных признаков на особь по десяти краниологическим признакам.

биоиндикаторов – красной полевки, березы тошей и ольховника кустарникового (Шадрина и др., 2008).

Для ольховника кустарникового удалось оценить показатель ФА при значительных колебаниях ХПРФ (рис. 3а), различия с контрольным биотопом достигали статистически значимого уровня начиная с уровня ХПРФ 300 мкР/ч и отмечена положительная корреляционная зависимость показателя ФА от уровня радиационного фона (коэффициент корреляции Спирмена 0.90;

$p < 0.05$). У березы тошей (рис. 3б) статистически значимые различия с контролем отмечены только для небольших участков с ХПРФ свыше 180 мкР/ч (по критерию Стьюдента $p < 0.05$). Для красной полевки статистически значимых различий не отмечено, но повышение частоты асимметричных проявлений при повышении уровня радиации можно отметить на уровне тенденции (рис. 3в).

Повышение показателей нарушения стабильности развития растений и животных свидетельствует о том, что в условиях ХПРФ наблюдается ухудшение условий существования для растений и животных, что проявляется в повышении уровня ФА. В целом отмечена положительная зависимость величины показателей ФА от радиационного загрязнения. При этом для двух видов растений в ФА в градиенте загрязнителя, существенно различающаяся по дозовому эффекту: у березы тошей в североаэжной подзоне пороговой величиной, приводящей к резкому повышению уровня ФА была средняя доза около 180 мкР/ч, тогда как в более благоприятных условиях Южной Якутии у ольховника кустарникового значимые различия с контролем отмечены при уровне 300 мкР/ч и выше. У обоих видов зависимость не линейная: отмечено некоторое снижение уровня ФА при предпороговых значениях радиационного фона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследования, проведенные в течение 20 лет, доказывают практическую ценность метода оценки качества среды по показателям нарушения стабильности развития. Более того, необходимо отметить высокую чувствительность и универсальность метода. Фактически применение этой методики ограничивает только отсутствие организмов на исследуемой территории. Указанный метод позволяет провести экспресс анализ интегрального состояния конкретного участка даже при многофакторном воздействии, когда это затруднено с помощью приборной базы.

Применение показателей ФА позволяет дать оценку качества среды и сравнить состояние территорий, находящихся в разных природно-климатических условиях, сопоставление которых затруднено из-за многокомпонентных, неодинаковых по силе и разным по генезису антропогенных воздействий, а также из-за различия экосистемных показателей.

Сравнение результатов применения разных биоэкологических подходов (показатели биоразнообразия), популяционных показателей с методом оценки среды по показателям ФА, продемонстрировали высокую чувствительность этого метода. Безусловно, идеальным вариантом является совмещение оценки состояния среды по показателям ФА

с эколого-геохимическими исследованиями, а также и с другими методами биоиндикации или биотестирования, но даже без последних анализ ситуации с применением показателей ФА дает в практическом плане достоверные сведения о состоянии окружающей среды.

Необходимо отметить, что при проведении исследований необходимо всегда рассматривать как преобразованные так и контрольные участки, кроме того желательно иметь базу данных по региону, что значительно повышает достоверность исследований.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность коллегам к.б.н. [В.А. Данилову], к.б.н. В.Ю. Солдатовой, к.б.н. Е.Н. Луцкан, к.б.н. Т.М. Пудовой, к.б.н. Д.Я. Шадрину, а также студентам и аспирантам Н.Н. Алексеевой, Я.Р. Капитоновой, Н.Н. Осинцевой, Н.М. Михайловой, С.И. Федоровой, принимавшим участие в сборе и обработке материала для данного исследования.

Работа выполнена в рамках госзадания ИБПК СО РАН на 2017–2020 гг. по теме: “Структура и динамика популяций и сообществ животных холодного региона Северо-Востока России в современных условиях глобального изменения климата и антропогенной трансформации северных экосистем: факторы, механизмы, адаптации, сохранение” (регистрационный номер: АААА-А17-117020110058-4) и госзадания Минобрнауки РФ 5.81692017/8.9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Блиновский И.К., Хрусталева Л.И., Злобин А.И., Головина Ю.М., Балахнина Н.В. Методические рекомендации по комплексной оценке генетического риска применения фиторегуляторов в растениеводстве. — М.: Колос, 1992.— 28 с.
- Булатова Е.С., Бабина С.Г., Онищенко С.С. и др. Оценка состояния популяции березы повислой (*Betula pendula*) в ООПТ юга Сибири // Известия Самарского научного центра Российской Академии Наук. 2009. Т. 11, № 1–3. С. 363–368.
- Вайнерт Э., Вальтер Р., Ветцель Т. и др. Биоиндикация загрязнений наземных экосистем. М.: Мир, 1988. 348 с.
- Вольперт Я.Л., Легостаева Я.Б., Шадрина Е.Г., Поисева С.И., Щелчкова М.В., Портнягина Т.М., Петрова С.В., Макаров В.С. Интегральная оценка качества окружающей среды на территории г. Мирного (Якутия) // Экология фундаментальная и прикладная. Проблемы урбанизации. / Матер. Междунар. Научно-практ. Конф. Екатеринбург, 3–4 февраля 2005 г. — Екатеринбург, 2005а. — С. 78–80.
- Вольперт Я.Л., Сапожников Г.В. Реакция населения мелких млекопитающих при различных формах техногенных воздействий на арктические ландшафты // Экология. 1998. № 2. С. 133–138.
- Вольперт Я.Л., Шадрин Д.Я., Шадрина Е.Г. и др. Сообщества мелких млекопитающих антропогенных ландшафтов Западной Якутии // Наука и образование. 2005.— № 2 (38). С. 47–52.
- Вольперт Я.Л., Шадрина Е.Г., Данилов В.А., Шадрин Д.Я., Величенко В.В. Сообщества мелких млекопитающих антропогенных ландшафтов Западной Якутии // Наука и образование. 2005б. № 2 (вып. 38). С. 47–52.
- Гуртяк А.А., Углев В.В. Оценка состояния среды городской территории с использованием березы повислой в качестве биоиндикатора // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 317, № 1. С. 200–204.
- 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.
- Довгалюк А.И., Калиняк Т.Б., Блюм Я.Б. Оценка фито- и цитотоксической активности соединений тяжелых металлов // Цитология и генетика. 2001. № 1. С. 3–9.
- Дружжина Т.А., Лебедь Л.В., Гусакова Н.Н. Проблемы скрининговой оценки урбанизированных территорий на примере г. Саратова // Вестник Саратовского Госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. 2007. № 1. С. 6–9.
- Дударь Н.Л., Жуйкова Т.В., Блябляс А.П. Оценка качества среды по показателям флуктуирующей асимметрии *Betula pendula* Roth. // Актуальные проблемы экологии и биологии. Матер. докладов I Всерос. молодежн. научн. конф. “Молодежь и наука на севере” (в 3-х томах). Т. III. XV Всерос. молодежн. научн. конф. “Актуальные проблемы биологии и экологии” (Сыктывкар, Республика Коми, Россия, 14–18 апреля 2008 г.). Сыктывкар, 2008. С. 72–74.
- Егоров Н.Г., Вольперт Я.Л. Население мелких млекопитающих техногенных ландшафтов в бассейне р. Алдан // Биолого-экологические исследования в Республике Саха (Якутия). Якутск, 1996. С. 21–31.
- 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.
- Жуйкова Т.В., Безель В.С., Позолотина В.Н. Демографическая структура ценопопуляций *Taraxacum officinale* s.l. в условиях токсического загрязнения среды // Ботан. журн. 2001. Т. 86. № 8. С. 103–112.
- Жуйкова Т.В., Безель В.С., Позолотина В.Н., Северюхина О.А. Репродуктивные возможности растений в градиенте химического загрязнения среды // Экология. 2002. № 6. С. 431–436.
- Жуйкова Т.В., Мордвина Е.С. Трансформация травянистой растительности техногенно нарушенных территорий и оценка ее участия в биогенных циклах химических элементов // Ученые записки НТГСПА. Нижний Тагил, 2003. С. 155–165.

- Жуйкова Т.В. Флуктуирующая асимметрия: реакция на химическое загрязнение при изменяющихся погодноклиматических факторах // Антропогенная трансформация природной среды / Междунар. конф. 18–21 октября 2010 г. / Перм. гос. ун-т. Пермь, 2010. В 3-х томах. Т. 1. Ч. 1. – С. 293–299.
- Журавская А.Н., Прокопьев И.А., Воронов И.В. Изучение адаптивных возможностей ольхи кустарниковой, произрастающей в зоне повышенного естественного радиационного фона // Наука и образование. 2009. № 2. С. 69–73.
- Захаров В.М. Асимметрия животных. М: Наука, 1987. 216 с.
- Захаров В.М., Баранов А.С., Борисов В.И. и др. Здоровье среды: Методика оценки. М.: Центр экологической политики России, 2000а. 68 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., Дмитриев С.Г. и др. Здоровье среды: практика оценки. М.: Центр экологической политики России, 2000б. 318 с.
- Захаров В.М., Чубинишвили А.Т., и др. Мониторинг здоровья среды на охраняемых природных территориях. М.: Центр экологической политики России, 2001б. 148 с.
- Захаров В.М., Чубинишвили А.Т., Баранов А.С. и др. Здоровье среды: методика и практика оценки в Москве. – М.: Центр экологической политики России, 2001в. – 68 с.
- Захаров В.М., Кряжева Н.Г., Дмитриев С.Г., Трофимов И.Е. Оценка возможных изменений состояния популяций вследствие климатических изменений (на примере исследования стабильности развития березы повислой) // Успехи современной биологии. 2011. Т. 131, № 4. С. 425–430.
- Захаров В.М., Шефтель Б.М., Александров Д.Ю. Нарушение стабильности развития на фазе пика численности в популяциях млекопитающих // Доклады АН СССР. 1984. Т. 245. № 13. С. 761–764.
- Захарова В.И. Динамика растительности субарктических тундр и притундровых редколесий под влиянием горных разработок (низовья р. Яны): автореф. дис. ... канд. биол. наук (11.00.11). – Якутск, 2000. – 18 с.
- Звягинцева О.Ю. Оценка состояния воздушной среды г. Чита по величине флуктуирующей асимметрии *Betula pendula* // Наука и бизнес: пути развития. 2012. № 2. С. 9–12.
- Илькун Г.М. Загрязнители атмосферы и растения. – Киев: Наукова думка, 1978. – 246 с.
- Ишмуратова М.М., Зайнагбдинова Г.И. Демографические характеристики, семенная продуктивность *Dianthus acicularis* в естественных местах обитания и на техногенных субстратах // Экология фундаментальная и прикладная: Проблемы урбанизации / Материалы Междунар. научн.-практ. конференции. – Екатеринбург, 2005. – С. 192–194.
- 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.
- Кряжева Н.Г., Чистякова Е.К., Захаров В.М. Анализ стабильности развития березы повислой в условиях химического загрязнения. // Экология. 1996. № 6. С. 441–444.
- Кулагин Ю.З. Древесные растения и промышленная среда. – М.: Наука, 1974. – 124 с.
- Кунин И.М., Инсарова И.Д., Трушин С.Б. Действие сернистого ангидрида на метаболизм растительной клетки // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 2. Л.: Гидрометеоздат, 1979. С. 87–124.
- Куринный А.И. Биологическая индикация пестицидов-мутагенов в окружающей среде по частоте аберраций хромосом у растений // Цитология и генетика, 1985. 19 (4): pp. 268–270.
- Лабутина М.В., Аношова Н.В., Лабутин Д.С. Жизнеспособность пыльцы некоторых видов цветковых в зависимости от условий обитания // Экология фундаментальная и прикладная: Проблемы урбанизации / Материалы Междунар. научн.-практ. конференции. – Екатеринбург, 2005. С. 192–194.
- Легостаева Я.Б., Шадрин Е.Г., Солдатова В.Ю., Дягилева А.Г. Эколого-геохимическая и биоиндикационная оценка трансформации экосистем при разработках коренных месторождений алмазов в Якутии // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 2. Электронный журнал. URL: www.science-education.ru/95-4569 (дата обращения: 01.03.2012).
- Лукьянова Л.Е., Лукьянов О.А. Реакция сообществ и популяций мелких млекопитающих на техногенные воздействия / I. Сообщества // Успехи современной биологии. 1998а. Вып. 5. С. 613–622.
- Лукьянова Л.Е., Лукьянов О.А. Реакция сообществ и популяций мелких млекопитающих на техногенные воздействия / II. Популяции // Успехи современной биологии. 1998б. Вып. 6. С. 693–706.
- Луцкан Е.Н., Шадрин Е.Г. Биоиндикационная оценка состояния окружающей среды города Алдана на основе анализа флуктуирующей асимметрии березы плосколистной // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 8–2. С. 139–142.
- Миронова С.И. Техногенные сукцессионные системы растительности Якутии. Новосибирск: Наука. Сиб. изд. фирма РАН, 2000. 150 с.
- Мокров И.В., Гелашвили Д.Б. Оценка качества среды по стабильности развития березы повислой (*Betula pendula* Roth) // Экологические и метеорологические проблемы больших городов и промышленных зон: Тез. докл. Всерос. науч. конф. СПб.: Росгидромет. 1999. С. 43–44.
- Мокров И.В., Малова А.А. Анализ стабильности развития березы повислой в условиях заповедника

- “Керженский” // Тр. биол. ф-та Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. 1999. Вып. 2. С. 62–65.
- Мухачева С.В., Давыдова Ю.А., Воробейчик Е.Л. Роль гетерогенности среды в сохранении разнообразия мелких млекопитающих в условиях сильного промышленного загрязнения // Доклады Академии Наук. 2012, Т. 447, № 1. С. 106–109.
- Мэннинг У.Д., Федер У.А. Биомониторинг загрязнения атмосферы с помощью растений. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 143 с.
- Николаевский В.С. Экологическая оценка загрязнения среды и состояния наземных экосистем методами фитоиндикации. М.: МГУЛ, 1999. 193 с.
- Петров А.Н. Мелкие млекопитающие (Insectivora, Rodentia) трансформированных и ненарушенных территорий восточноевропейских тундр. СПб.: Наука, 2007. 177 с.
- Последствия Чернобыльской катастрофы: Здоровье среды / Под ред. В.М. Захарова, Е.Ю. Крысанова. М., 1996. 169 с.
- Прокопьев И.А., Журавская А.Н., Филиппова Г.В. Изменчивость биохимических параметров и радиоустойчивость семенного потомства дескурайнии гулявниковой и клоповника безлепестного под действием различных факторов // Экология. 2011. № 4. С. 259–265.
- Савиццева Л.С., Егошина Т.Л., Ширяев В.В. Оценка качества урбаносреды г. Кирова на основе анализа флуктуирующей асимметрии листовой пластинки березы повислой (*Betula pendula* Roth.). 2012. Вестник Удмуртского Университета. Серия Биология. Науки о Земле, 2. С. 31–37.
- Семенова В.А., Буторина А.К., Голуб В.Б. Анализ цитогенетических нарушений березы повислой (*Betula pendula*) и уровня флуктуирующей асимметрии березового щитника (*Elastmucha grisea*) в г. Воронеже // Проблемы региональной экологии. 2007. № 4. С. 105–108.
- 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.
- Солдатова В.Ю., Шадрина Е.Г., Цона М.В. Оценка качества среды территории г. Нарофоминска по величине флуктуирующей асимметрии березы повислой (*Betula pendula* Roth.) (статья) Бюллетень московского общества испытателей природы. Отд. биологический. 2009. Т. 114, вып. 3. Прил. 1, ч. 2. Экология. Природные ресурсы. Рациональное природопользование. Охрана окружающей среды. С. 365–370.
- Солдатова В.Ю., Шадрина Е.Г. Оценка качества среды территории г. Якутска по показателю нарушения стабильности развития березы плосколистной (*Betula platyphylla* Sukacz.). Якутск: Издательский дом СВФУ, 2016. 112 с.
- Стрельцов А.Б., Шестакова Г.А., Логинов А.А. и др. Оценка качества среды г. Дубны методами биоиндикации как основа городского биомониторинга. КГПУ. Калуга, 1997. Деп. в ВНИИЦ, № 02.9.80.005792.
- Таскаев А.И., Тестов Б.В. Численность и размножение мышевидных грызунов в зоне Чернобыльской аварии // Биоиндикация радиоактивных загрязнений. М., 1999. С. 200–205.
- Трубина Л.К., Храмова Е.П., Луговская А.Ю. Оценка качества окружающей среды урбанизированной территории по величине флуктуирующей асимметрии листа // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. Т. 4, № 2. С. 185–188.
- Турмухаметова Н.В. Особенности морфогенеза побегов и феноритмов *Betula pendula* Roth. и *Tilia cordata* Mill. в условиях городской среды / Автореф. дис. ... кан. биол. наук (03.00.16). Новосибирск, 2005. 19 с.
- Турмухаметова Н.В., Сухоруков М.В. К изучению флуктуирующей асимметрии листа *Betula pendula* Roth. // Проблемы популяционной биологии / Матер. XII Всерос. науч. семинара памяти Н.В. Глодова, 11–14 апреля 2017 г., г. Йошкар-Ола. Йошкар-Ола, 2017. С. 260–262.
- 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 красноярского государственного аграрного университета, 2011. 12: pp. 135–140.
- Шадрина Е.Г., Вольперт Я.Л. Биоиндикация воздействия горнодобывающей промышленности на наземные экосистемы Севера: эффективность использования ценотического, популяционного и онтогенетического подходов // Биологические системы: устойчивость, принципы и механизмы функционирования. Матер. V Всерос. научно-практ. конф. 1–4 марта 2017 г., Нижний Тагил. 2017. С. 346–356.
- 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. Реакция популяций мелких млекопитающих на стрессирующие воздействия природного и антропогенного происхождения // Наука и образование. 2004. № 2. С. 38–46.
- Шадрина Е.Г., Вольперт Я.Л., Алексеева Н.Н. и др. Биоиндикационная оценка изменения качества окружающей среды в результате воздействия алмазодобывающих предприятий // Горный журнал. 2012а. № 2. С. 84–87.
- Шадрина Е.Г., Вольперт Я.Л., Данилов В.А. Показатели нарушения стабильности развития растений и животных как критерии качества среды в зоне воздействия предприятий угледобывающей промышленности на территории Якутии // Проблемы региональной экологии. 2009. № 3. С. 43–48.
- Шадрина Е.Г., Вольперт Я.Л., Данилов В.А., Шадрин Д.Я. Биоиндикация воздействия горнодобывающей про-

- мышленности на наземные экосистемы Севера (морфогенетический подход). Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 2003. 110 с.
- Шадрина Е.Г., Вольперт Я.Л., Солдатова В.Ю., Алексеева Н.Н. Сравнительный анализ качества среды административного и промышленного центров на территории Якутии по показателю флуктуирующей асимметрии березы плосколистной // Проблемы региональной экологии. 2016. № 4. С. 86–91.
- Шадрина Е.Г., Вольперт Я.Л., Солдатова В.Ю., Протопопова В.В., Бурцева Н.Н., Федорова С.И. Оценка состояния среды в долине р. Лены по показателям стабильности развития организмов // Экологическая безопасность р. Лены. Мониторинг, природные и техногенные катастрофы / Материалы Респ. научно-практ. конф. Якутск, 23 ноября 2001 г. Якутск, 2001. С. 119–127.
- Шадрина Е.Г., Луцкан Е.Н. Влияние транспортной нагрузки и атмосферного загрязнения на показатель флуктуирующей асимметрии березы плосколистной на территории Алданского района Республики Саха (Якутия) // Наука и образование. 2016. № 1. С. 121–126.
- Шадрина Е.Г., Николаева Л.А. Влияние стрессорирующих воздействий на морфологические характеристики и стабильность развития серой крысы естественных и лабораторных популяций // Наука и образование. 2006. № 2. С. 7–12.
- Шадрина Е.Г., Пудова Т.М., Солдатова В.Ю. Биоиндикация качества среды на стадии разведки месторождений углеводородного сырья (на примере Юго-Западной Якутии) // Фундаментальные исследования. 2012. № 4. С. 206–211.
- Шадрина Е.Г., Сидоров М.М., Данилов В.А., Колесов С.С. Население мелких млекопитающих в зоне влияния нефтегазодобывающей промышленности в нижнем течении р. Вилюй (Западная Якутия) // Проблемы региональной экологии. 2014. № 1. С. 273–276.
- 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. 234–235.
- Шадрина Е.Г., Солдатова В.Ю., Шадрин Д.Я., Капитонова Н.Н. Оценка качества среды по показателям нарушения стабильности развития растений и животных в условиях хронически повышенного радиационного фона на территории Якутии // Проблемы региональной экологии. 2008. № 2. С. 91–95.
- Шадрина Е.Г., Шилев С.А. Морфологические и репродуктивные показатели одуванчика рога носого (*Taraxacum ceratophorum* Ledeb.) в природных биотопах Якутии и на городских территориях // Прикладная экология Севера: экологические проблемы северных городов / Матер. Респ. научно-практ. Конф. 9–10 октября 2008 г., г. Якутск. Якутск, 2009. С. 67–73.
- Шеин А.А., Проконьев И.А., Филиппова Г.В., Журавская А.Н. Влияние техногенного загрязнения на содержание фотосинтетических пигментов и флавоноидов у *Matricaria chamomila* (Asteraceae) // Растительные ресурсы. 2014. Т. 50. № 2. С. 235–241.
- Шержукова Л.В., Кривцова А.П., Мелузова М.И., Мишаленкова Ю.Н. Оценка стабильности развития липы мелколистной на заповедной и урбанизированной территориях // Онтогенез. 2002. Т. 33. № 1. С. 16–18.
- Шилова С.А. Популяционная организация млекопитающих в условиях антропогенного воздействия // Успехи современной биологии. 1999. Т. 119. вып. 5. С. 487–503.
- Developmental Homeostasis in Natural Populations of Mammals: Phenetic Approach / Ed. V.M. Zakharov, A.V. Yablokov // Acta Theriologica. 1997. Suppl. 4. 92 p.
- Developmental Stability in Natural Populations / Eds. V.M. Zakharov, J.H. Graham // Acta Zool. Fennica. 1992. № 191. 200 p.
- Leary P.F., Allendorf F.M. Fluctuating asymmetry as an indicator of stress. Chance use in protect nature // Acta Zool. Fennica. 1989. Vol. 4. pp. 214–217.
- Palmer R.A., Strobeck C. Fluctuating asymmetry: a measurement, analysis, patterns // Annual Review in Ecology and Systematic. 1986. Vol. 17. P. 391–421.
- Parsons P.A. Fluctuating asymmetry: a biological monitor of environmental and genomic stress // Heredity. 1992. 68. P. 361–364.
- Parsons P.A. Fluctuating asymmetry: an epigenetic measure of stress // Biol. Rev. 1990. № 65. P. 131–145.
- 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; doi: 10.3390/sym8120142
- Shadrina E., Volpert Ya., Soldatova V., Alekseeva N., Pudova T. Evaluation of Environmental Conditions in Two Cities of East Siberia Using Bio-indication Methods (Fluctuating Asymmetry Value and Mutagenic Activity of Soils) // International Journal of Biology; Vol. 7, No. 1; 2014. Pp. 20–32.
- Shadrina E.G., Pudova T.M., Soldatova V. Yu., Legostaeva Ya. B. Bioindicational Assessment Of Environmental Quality In Habitats Exposed To Geological Exploration For Hydrocarbon (Oil And Gas) Deposits In The West Yakutia // 15th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM2015. / Ecology, Economics, Education and Legislation. Conference Proceedings. Vol. 1/ Ecology & Environmental Protection. 18–24 June, 2015. Albena, Bulgaria. Pp. 95–102.
- Valetsky A.V., Dmitrieva I. L., Krushinskaya N.L. et al. Social stress impact on developmental stability of laboratory rat *Rattus norvegicus* // Acta Theriologica. 1997. Suppl. 4. P. 27–32.
- Zacharov V.M., Demin D.V., Baranov A.S. et al. Developmental stability and population dynamics of shrews *Sorex* in Central Siberia // Acta Theriol. 1997. № 4. P. 41–48.

Experience of Applying Plant and Animal Fluctuating Asymmetry in Assessment of Environmental Quality in Terrestrial Ecosystems: Results of 20-Year Studies of Wildlife and Anthropogenically Transformed Territories

E. G. Shadrina^{1,*} and Ya. L. Vol'pert²

¹*Institute of Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, 677000 Russia*

²*Institute of Applied Ecology of North, Ammosov Northeastern Federal University, Yakutsk, 677000 Russia*

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

Received June 22, 2017

The value of fluctuating asymmetry (FA) of trees and small mammals is considered as an indicator of developmental instability. The urban territories with recreation zones, sites with increased radiation background, and the areas affected by mining facilities have been analyzed as anthropogenically transformed areas. The following tree and small mammalian species are the objects of the study: Siberian silver birch (*Betula platyphylla*), spreading birch (*B. divaricata*), dwarf birch (*B. exilis*), shrub alder (*Duschekia fruticosa*), basket willow (*Salix viminalis*), northern red-backed vole (*Clethrionomys rutilus*), tundra vole (*Microtus oeconomus*), Laxmann's shrew (*Sorex caecutiens*), and tundra shrew (*S. tundrensis*). In total, 60000 leaves have been measured and 3500 rodent skulls have been examined. The issues of selection of bioindicator species and the factors distorting the results of environmental quality assessment according to developmental instability are discussed. A statistically significant increase in FA of plants is recorded in urban territories as compared with the wildlife biotopes. A positive correlation of FA value with transport load, concentration of heavy metals in soil, and atmospheric air pollution is observed. The proximity to a roadway and the state of road pavement influence the FA value. The main source of pollution in the administrative center (Yakutsk) is motor vehicles; correspondingly, large streets and crossroads with a high transport load are the most polluted sites. As for the industrial center (city of Mirnyi), pollution spreads from the areas affected by mining to the residential area. The main pollution source in a small administrative center (city of Aldan) is the federal highway. It is recommended to concurrently use the FA characteristics of plant and animals in the area affected by the mining industry. Characteristic of this industry is withdrawal of large areas of natural landscapes; typically, transformed plots alternate weakly affected plots. The specific features of the effects of diamond, gold, and coal-mining industries, as well as oil and gas field development, are discussed, which should be taken into account in sampling for bioindication. The problem of bioindication in the areas completely devoid of soil and plant cover can be solved by biotesting via assessment of bunching onion seed germination rate and the rate of mitotic aberrations. An increase in the FA level in trees and small mammals is observed in the areas transformed by the mining industry displaying a chronically increased radiation background and oil-polluted as a result of technogenic accidents. The use of FA index makes it possible to estimate the environmental quality and to compare the state of territories located under different natural and climatic conditions and influenced by multicomponent anthropogenic impacts differing in their strength and genesis, which interferes with their comparison.

Keywords: developmental stability, fluctuating asymmetry, bioindication, biotesting, Siberian silver birch, small mammals, urbanized territory, mining industry