

УДК 574.2:57.04

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОМЕОСТАЗА РАЗВИТИЯ В ПРИРОДНЫХ ПОПУЛЯЦИЯХ. КОНЦЕПЦИЯ ЗДОРОВЬЯ СРЕДЫ: МЕТОДОЛОГИЯ И ПРАКТИКА ОЦЕНКИ

© 2017 г. В. М. Захаров^a, Е. Ю. Крысанов^b, А. В. Пронин^c, И. Е. Трофимов^{a, *}

^aИнститут биологии развития им. Н.К. Кольцова РАН
119334, г. Москва, ул. Вавилова, д. 26

^bИнститут проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН
119071, г. Москва, Ленинский пр. 33

^cНаучно-исследовательский центр эпидемиологии и микробиологии им. Н.Ф. Гамалеи Минздрава России, Москва
123098, г. Москва, ул. Гамалеи, д. 18

*E-mail: ecopolicy@ecopolicy.ru

Поступила в редакцию 22.06.2017 г.

Все возрастающее антропогенное воздействие на окружающую природную среду определяет актуальность и значимость обеспечения разносторонней оценки и мониторинга его последствий. В качестве операционального подхода для решения этой задачи предлагается методология оценки здоровья среды, основанная на характеристике состояния разных видов живых существ по гомеостазу развития. Проведенная апробация методологии в ходе выполнения ряда проектов по оценке качества среды при разных видах антропогенного воздействия позволяет охарактеризовать возможности используемых при этом подходов для оценки благоприятности среды для живых существ и человека. Это также открывает возможность для оценки диапазона возможных изменений гомеостаза развития в реальных природных условиях.

Ключевые слова: гомеостаз развития, природные популяции, здоровье среды

DOI: 10.7868/S0475145017060052

ВВЕДЕНИЕ

Все возрастающее воздействие на окружающую природную среду диктует необходимость контроля ее состояния, обеспечения ее благоприятности для живых существ и человека. Эта задача все чаще звучит как обеспечение здоровья среды. Под здоровьем среды, в самом общем смысле, принимается ее состояние (качество), необходимое для обеспечения здоровья человека и других видов живых существ. Это ставит на повестку дня необходимость разработки операциональных систем его оценки.

Существует большой арсенал методов для выявления эффекта различных воздействий на состояние среды. Основная проблема состоит не в разработке новых методов, а в создании методологии, обеспечивающей критерии того, как сделать правильный выбор. Методология оценки здоровья среды как раз и предлагает возможный путь решения этой задачи. Обоснование подхода предполагает как характеристику его соответствия современным требованиям к организации мониторинга качества среды, так и апробацию для оценки возможностей его практического использования.

ЗНАЧИМОСТЬ ОЦЕНКИ ЗДОРОВЬЯ СРЕДЫ

Оценка качества среды оказывается узловой задачей любых мероприятий в области охраны природы и природопользования. При всей важности проведения оценки качества среды на всех уровнях, с применением различных подходов приоритетной представляется именно биологическая оценка, связанная с оценкой благоприятности условий для живых существ и человека. При учете того, что определение содержания каждого поллютанта в различных компонентах среды и лабораторная оценка его токсичности, в особенности, при учете возможного кумулятивного эффекта различных воздействий, не представляется возможным, на первый план выходит оценка состояния живых существ при всем комплексе имеющихся воздействий.

Система оценки качества среды в настоящее время должна быть адекватной для решения ряда задач. Используемые подходы и методы должны обеспечивать возможность для выявления последствий различных, как естественных, так и антропогенных воздействий, включая факторы химического и физического загрязнения среды, изменение ландшафтов и др. Оценка среды необходима как в

пространстве, так и во времени. Отдельной задачей, роль которой сейчас все возрастает, является обеспечение регистрации откликов окружающей среды не только на возрастание, но и на снижение степени неблагоприятного воздействия.

Для решения указанных задач современные подходы и методы оценки должны отвечать следующим требованиям.

Прежде всего, это необходимость оценки степени отклонения исследуемых показателей от оптимальных значений. Какие-то изменения происходят постоянно. Важно получить ответ на вопрос о том, допустимы ли они, находятся ли в пределах нормы, или свидетельствуют об отклонении. Необходима оценка “позитивности” или “негативности” происходящих изменений, степени их отклонений от условной нормы. Далее, это оценка наиболее общих параметров. Для решения задачи оценки качества среды в целом, необходимо использовать наиболее общие параметры, характеризующие важнейшие принципиальные черты состояния системы.

Чувствительность методов, применяемых для оценки состояния среды, является одним из наиболее важных требований. Это определяется необходимостью оценивать не только и не столько существенные, как правило, уже необратимые, изменения в среде, но и менее значительные отклонения, когда еще возможен возврат к прежнему нормальному состоянию. Вместе с тем, чувствительность применяемых подходов не должна быть чрезмерной. Методы и подходы, обладающие повышенной чувствительностью, могут давать неадекватную информацию, выявляя обычные флуктуации в состоянии любой системы.

Методология должна быть универсальной как в отношении вида оцениваемого воздействия, так и типа экосистем и вида живых существ, по отношению к которым такая оценка проводится. Она должна быть пригодная для широкого использования с целью оценки реальной природной ситуации. Даже самые совершенные лабораторные модели, позволяющие оценить биологические последствия различных антропогенных воздействий, обычно оказываются недостаточными для понимания реальной ситуации в природе.

Все это свидетельствует об актуальности поиска все новых форм мониторинга, разработки операциональной системы интегральной биологической оценки состояния видов и экосистем, пригодной для широкого использования с целью ранней “диагностики” происходящих изменений среды.

МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ЗДОРОВЬЯ СРЕДЫ

Суть предлагаемой методологии — в том, что характеристика качества среды производится пу-

тем оценки состояния разных видов живых существ. Особенностью такого подхода является то, что для оценки состояния экосистемы используются не экосистемные и популяционные параметры, как таковые, а показатели состояния организма.

Характеристика популяции получается по усредненным оценкам для выборки особей. Операциональным подходом для биомониторинга на экосистемном уровне может быть получение ответа на вопрос о состоянии популяций различных видов живых организмов, представляющих различные ее компоненты. Путем суммирования такой информации можно получить характеристику состояния экосистемы.

Таким образом, в соответствии с предлагаемой системой главным объектом биомониторинга оказывается состояние организма, надежная оценка которого может быть получена на популяционном уровне. Биологическая характеристика экосистемного уровня сводится к оценке состояния популяций составляющих ее видов. Именно в этом и заключается ключевое значение исследования природных популяций, от состояния которых, в конечном счете, зависит как сохранение отдельных видов, так и нормальное функционирование экосистем.

Предлагаемая система мониторинга основана на использовании различных подходов для оценки состояния природных популяций разных видов, находящихся под воздействием различных естественных и антропогенных факторов. Фундаментальным показателем такого состояния является эффективность механизмов гомеостаза развития. В нормальных условиях организм реагирует на воздействие среды посредством системы буферных гомеостатических механизмов. Эти механизмы поддерживают оптимальное протекание процессов развития. Под воздействием неблагоприятных условий эти механизмы могут быть нарушены, что приводит к изменению различных показателей развития (Захаров, 1987; Developmental Instability..., 1994; Developmental Homeostasis..., 1997). Такие нарушения гомеостаза могут происходить до появления изменений обычно используемых параметров жизнеспособности. Такой подход к оценке здоровья среды, основанный на исследовании эффективности гомеостатических механизмов, открывает возможность для выявления начальных последствий определенного неблагоприятного воздействия.

Изменения гомеостаза развития отражают базовые изменения функционирования живых существ и находят выражение в процессах, протекающих на разных уровнях, они могут быть оценены по различным параметрам с использованием различных методов.

Принципиальная важность гомеостаза развития для живого организма позволяет использовать для анализа разные виды животных и растений. Нарушения, выявляемые по разным показателям у разных видов, являются свидетельством изменения состояния организма при определенном воздействии, исключая возможность выявления частного специфического ответа или артефакта.

Методология предполагает использование спектра методов, которые оценивают эффективность механизмов гомеостаза развития. Достаточно условно они могут быть отнесены к пяти основным подходам, позволяющим получить разностороннюю характеристику состояния организма. В пределах каждого из этих подходов существует целый ряд различных методов, позволяющих выявлять изменения в различных параметрах функционирования организма. Однако многие из этих методов оказываются неприменимыми, поскольку либо не могут быть использованы для характеристики гомеостаза развития, либо не отвечают определенным базовым требованиям, таким, как достаточная чувствительность для выявления начальных обратимых изменений. При этом подразумевается, что набор конкретных методов в зависимости от целей проводимой оценки, а также по мере совершенствования технологий может варьировать.

Основные подходы могут быть кратко охарактеризованы следующим образом (более детальное описание основных подходов см. Биотест..., 1993; Захаров и др., 2000, 2001а).

Морфологический подход. Прежде всего, уровень гомеостаза развития может быть оценен по морфологическим критериям. Основным подходом при оценке морфологических изменений, вследствие нарушений гомеостаза развития, является морфогенетический, который связан с оценкой стабильности развития. Эта характеристика дает оценку совершенства онтогенетических процессов по величине фенотипического разнообразия, связанного с нарушениями в индивидуальном развитии (Soule, 1967; Valentine, Soule, 1971; Захаров, 1987; Palmer et al., 1994; Clarke, 1995). Снижение эффективности гомеостаза приводит к возрастанию частоты отклонений от нормального строения различных морфологических структур, как следствие “онтогенетического шума”, оценка которого возможна по величине флуктуирующей асимметрии (как незначительных направленных отклонений от совершенной билатеральной симметрии). Уровень таких морфологических отклонений от нормы оказывается минимальным лишь при определенных условиях, которые могут рассматриваться как оптимальные, и неспецифично возрастает при любых стрессовых воздействиях. Для комплекса морфо-

логических признаков используется величина интегрального показателя флуктуирующей асимметрии. Для получения сравнительных оценок разработана пятибалльная шкала отклонений состояния организма от нормы по величине интегрального показателя. Частота фенотипических отклонений в развитии, патологоанатомические и гистологические изменения также могут быть использованы для оценки стрессовых воздействий. Но они часто отражают специфические необратимые изменения и могут быть использованы, главным образом, для подтверждения серьезности выявляемых последствий при существенном воздействии неблагоприятных факторов.

Генетический подход. Цитогенетические изменения в соматических клетках представляют собой интегральный показатель гомеостаза развития, характеризуя как мутагенность среды, так и эффективность иммунной системы организма. В норме, большинство генетических нарушений элиминируется за счет различных механизмов. Наличие таких нарушений является индикатором стресса, ведущего к появлению аномальных клеток. Такие генетические нарушения могут быть выявлены как на хромосомном, так и на молекулярном уровне. Цитогенетические методы, основанные на оценке структурных и числовых изменений хромосом в соматических клетках (включая микроядерный тест, сестринские хроматидные обмены, хромосомные абберрации и др.), а также разрывы ДНК (ДНК комет-тест) обеспечивают характеристику стрессового состояния организма (Орджоникидзе и др., 2014). По частоте абберрантных клеток разработана шкала отклонений состояния организма от условной нормы.

Физиологический. Стрессовое воздействие среды приводит к отклонению основных физиологических параметров организма от оптимального уровня. Существует большое число физиологических тестов на отклонение от оптимума, многие из них оказываются непригодными, поскольку не отвечают базовым требованиям (главным образом, в связи с частным характером оценок, недостаточной универсальностью и чувствительностью).

Одной из наиболее важных характеристик гомеостаза, высоко чувствительных к стрессовому воздействию среды, является энергетическая стоимость физиологических процессов. Среди различных методов исследования энергетического обмена наиболее доступным является оценка потребления кислорода. Наиболее экономичный энергетический обмен имеет место лишь при строго определенных условиях среды, которые могут быть охарактеризованы как оптимальные.

Другой базовой характеристикой гомеостаза развития, перспективной для оценки стрессо-

вых воздействий, является ритмика ростовых процессов.

Биохимический. С биохимической точки зрения изменение гомеостаза развития в ответ на стрессовое воздействие среды может быть оценено по эффективности биохимических реакций, уровню ферментативной активности и концентрации определенных продуктов обмена. Использование как неспецифических (таких, как оксидазы), так и специфических ферментов открывает возможность для оценки общего и частного ответов на средовые изменения. Изменение определенных базовых биохимических процессов и структуры ДНК в результате биохимических реакций (например, при оксидантном стрессе) могут обеспечить необходимую информацию о реакции организма в ответ на стрессовое воздействие.

Иммунологический. Одной из наиболее важных характеристик состояния живого организма является оценка эффективности иммунной системы. В дополнение к выше указанному цитогенетическому подходу, характеризующему эффективность иммунной системы организма в отношении элиминации клеток с генетическими нарушениями, возможна оценка и других изменений иммунной потенции организма путем анализа других иммунологических параметров, таких как состав крови, продукция антител, эффективность иммунного ответа, устойчивость к заболеваниям и стрессу, и др. В качестве одного из основных показателей было предложено использовать пролиферативную активность лимфоидных клеток, а для балльной оценки — индекс отклонений от условной нормы.

Основополагающим принципом описанных подходов и методов является наличие оптимального уровня, любые отклонения от которого свидетельствуют о наличии стрессового воздействия (Zakharov, 2003). Обычно при оценке оптимума по любому параметру возникает вопрос о том, в отношении какой из характеристик организма данные условия являются оптимальными. Оптимум, однако, оказывается сходным, если используемые показатели с разных сторон оценивают общую характеристику состояния организма. Столь разные параметры, такие как асимметрия морфологических признаков, показатели крови, интенсивность потребления кислорода, ритмика роста и частота хромосомных aberrаций могут изменяться согласованно, когда при определенном воздействии имеет место изменение в общей характеристике организма — гомеостазе развития. Изменения, выявляемые при использовании разных подходов, и свидетельствуют об отклонении состояния организма.

Предлагаемая методология может быть использована для оценки различных экосистем по состоянию ряда видов растений и животных. Для оцен-

ки используется система методов, определяющих состояние живых организмов по комплексу морфологических, генетических, физиологических, биохимических и иммунологических параметров, характеризующих гомеостаз развития. Такое интегрирование результатов на индивидуальном и экосистемном уровнях позволяет получить надежную оценку качества среды и ее возможных изменений.

Поскольку предлагаемая система включает набор тестов, охватывающих различные стороны индивидуального развития организма, она обеспечивает разностороннюю интегральную оценку гомеостаза развития, а следовательно, и состояние живых организмов и качества среды в целом. Данный подход, основанный на применении ряда различных методов в отношении разных видов живых организмов, позволяет дать реальную оценку последствий воздействия и обеспечить получение интегральной оценки качества среды при всем комплексе воздействий, имеющем место на определенной территории.

Предлагаемая методология отвечает требованиям разносторонней комплексной оценки и открывает возможность для решения целого ряда задач, стоящих в настоящее время перед системами мониторинга.

Она оказывается связанной со многими другими подходами к решению задачи организации биологического мониторинга.

Программы биоразнообразия нацелены на характеристику природных ситуаций путем оценки видового разнообразия и его изменений, с учетом демографических параметров. При этом накапливается необходимая базовая информация о том, сколько каких видов и в каком количестве представлено в экосистеме. Важной дополнительной составляющей при этом могла бы быть информация о том, в каком состоянии находятся природные популяции исследуемого видового разнообразия, представленное в той или иной экосистеме (Вопросы экологического..., 2011).

Интенсивно развивающиеся экотоксикологические подходы, главным образом, нацелены на оценку последствий разных видов воздействия на различные характеристики живых организмов в лабораторных моделях. При этом создаются необходимые базы данных о эффектах воздействия того или иного поллютанта на определенные параметры жизнедеятельности организма (Wildlife..., 2010; Kendall, 2016). Это позволяет прогнозировать степень их потенциальной опасности для живой природы. Существенной дополнительной информацией при таком подходе оказывается интегральная оценка состояния видов живых существ в природе при всем комплексе различных воздействий.

Разрабатываемая система биомаркеров нацелена на обнаружение последствий воздействия различных химических соединений на определенные физиологические и биохимические показатели состояния организма (Peakall, 1992; Biomarkers..., 1999). Развивается направление, связанное с оценкой и поддержанием благополучного состояния организма для разных видов животных по этологическим и физиологическим показателям (Broom, Johnson, 1993; Broom, 2007). Совместными усилиями медиков и экологов развивается пограничный подход, устанавливающий параллель в реализации задач охраны природы и обеспечения здоровья человека (conservation biology & conservation medicine), который условно может быть определен как экологическая медицина. На практике это означает выявление разносторонних связей здоровья человека и животных (Conservation..., 2002).

Суть предлагаемой методологии оценки здоровья среды как раз и состоит в ответе на вопрос о состоянии разных видов живых существ в природе. Оценка проводится в отношении того видового разнообразия, которое представлено в исследуемой экосистеме. Заключение дается на базе интегральной оценки состояния живого организма по наиболее общей характеристике, гомеостазу развития. Из арсенала различных методов отбираются те, которые пригодны для выявления неспецифического ответа живых существ на стрессовые воздействия в реальных природных ситуациях. Таким образом, предлагаемая методология оказывается пограничной, объединяя определенные аспекты различных подходов в области мониторинга среды, включая биотестирование и биоиндикацию, подходы, связанные с исследованием биоразнообразия и экотоксикологии, оценки благополучия животных и экологической медицины. Он дает интегральную характеристику здоровья отдельных видов и экосистемы в целом при всем многообразии различных естественных и антропогенных воздействий.

Все это и определяет перспективность подхода для решения задач экологического нормирования.

Характеристика здоровья среды основывается на оценке состояния разных видов живых существ, но получаемые результаты могут быть в значительной степени пригодны и для экстраполяции на человека. В результате оказывается возможным охарактеризовать качество оцениваемой среды и для людей. Большинство получаемых при этом оценок и выводов оказывается актуальным и для человека. Такая система оценки позволяет получить интегральную характеристику состояния среды в целом, ее благоприятности для человека и при этом лишена ряда ограничений, связанных с непосредственным изучением здоровья людей.

ПРАКТИКА ОЦЕНКИ

Оценка возможности использования предлагаемой методологии предполагает не только теоретические исследования для ее обоснования, но и проведение практических оценок в реальных природных ситуациях. Такая апробация была выполнена в ходе реализации ряда практических проектов, связанных с оценкой качества среды при разных видах антропогенного воздействия (в рамках национальных и международных программ “Биотест”, по линии Центра здоровья среды) (Захаров и др., 2000).

Оценка качества среды в районе центра химической промышленности

Исследование проводилось в районе серьезного загрязнения, вследствие работы химических предприятий (г. Чапаевск Самарской области), на серии точек как вблизи предприятий, так и на удалении от них (условный контроль), а также в месте сброса сточных вод.

В отношении наземных экосистем оценка проводилась на растениях и млекопитающих. Выявленное снижение уровня стабильности развития у березы повислой (*Betula pendula*) в районе предприятий, по сравнению с контролем (при статистически значимом различии, $p < 0.05$) (по величине интегрального показателя стабильности развития отклонение соответствует 4–5 баллу пятибалльной шкалы отклонений от условно нормального состояния, т.е. соответствует критическому состоянию), сопровождалось снижением фотосинтетической активности ($p < 0.01$) (рис. 1). Нарушение стабильности развития у двух исследованных видов млекопитающих (малая мышь (*Apodemus urolensis*) и рыжая полевка (*Clethrionomys glareolus*)) (по величине интегрального показателя отклонения от нормы соответствуют 4 баллу, $p < 0.05$) сопровождалось нарушением цитогенетического гомеостаза (что фиксировалось по частоте aberrантных клеток и микроядерному тесту, отклонения соответствуют 3–4 баллу пятибалльной шкалы, $p < 0.01$), и изменениями иммунного статуса и ритмики роста (рис. 2).

Сходная картина выявлена и в отношении водных экосистем. Вблизи предприятия и в районе сброса сточных вод было выявлено нарушение стабильности развития у двух исследованных видов рыб (плотва (*Rutilus rutilus*) и лещ (*Abramis brama*)) (по интегральному показателю отклонения от нормы соответствует 4–5 баллу пятибалльной шкалы) и у озерной лягушки (*Rana ridibunda*) (отклонения также на уровне пятого балла) ($p < 0.05$) (рис. 3). Экспериментальное биотестирование проб воды (в том числе и с использованием теста на сестринские хроматидные обмены для оценки возможных последствий для цитогенетического



Рис. 1. Величина показателей гомеостаза развития в выборках березы повислой (*Betula pendula*) из разных точек в районе центра химической промышленности (г. Чапаевск Самарской области). Стабильность развития оценивалась по величине интегрального показателя: среднее относительное различие между сторонами на признак по пяти промерам листа. Эффективность фотосинтеза оценивалась по величине отношения переменной флуоресценции к максимальной.

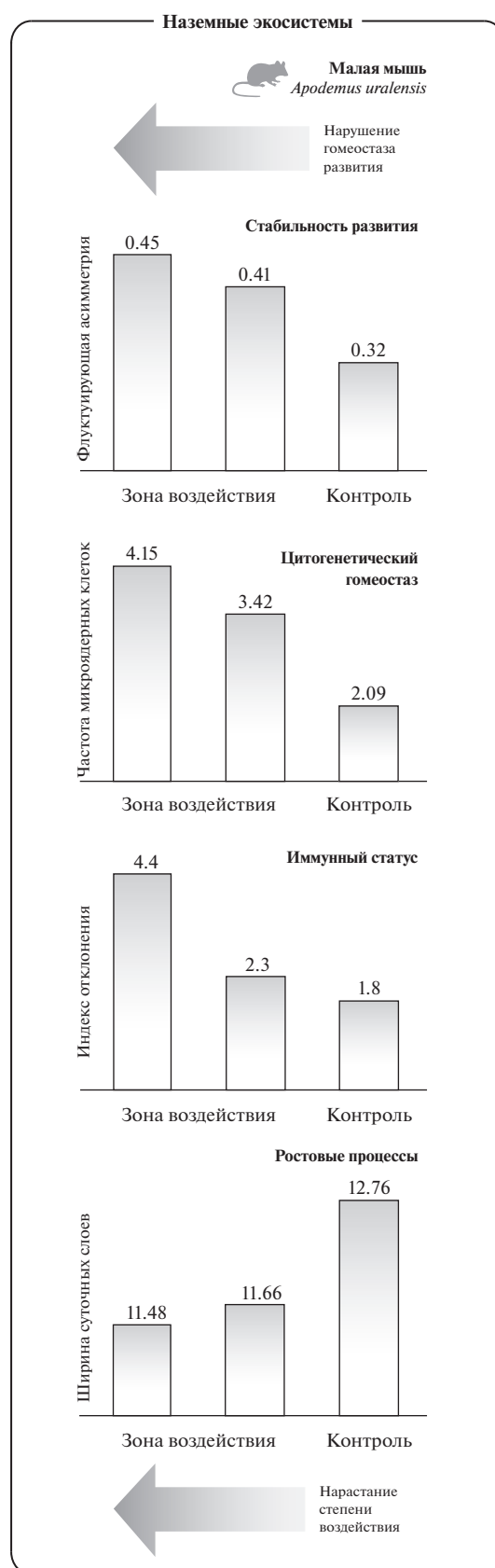


Рис. 2. Величина показателей гомеостаза развития в выборках малой мыши (*Apodemus uralensis*) из разных точек в районе центра химической промышленности (г. Чапаевск Самарской области). Стабильность развития оценивалась по величине интегрального показателя: средняя частота асимметричного проявления на признак по десяти краниологическим признакам. Цитогенетический гомеостаз оценивался по частоте клеток с микроядрами. Иммунный статус оценивался по величине интегрального индекса отклонений от условной нормы по ряду показателей состояния иммунной системы. Оценка ритмики роста проводилась по регистрирующим структурам: ширина суточных слоев дентина резца.

гомеостаза) показало, что при удовлетворительном качестве воды после биологической очистки, она оказывается токсичной при смешении с условно чистыми стоками, что свидетельствует о необходимости проведения очистки всех стоков.

В целом, в результате оценок, проведенных в районе исследования, были выявлены существенные изменения показателей здоровья среды (на уровне 4–5 балла, “критическое состояние”) как для наземных, так и для водных экосистем.

Результаты проведенной оценки были использованы для государственной экологической экспертизы и отнесения исследуемой территории к зоне экологического неблагополучия. Проведенная работа показала значимость и перспективность такой оценки как для характеристики состояния среды, так и для оценки ее благоприятности для здоровья человека. Выявленные серьезные изменения в состоянии организма наблюдаются на фоне высокого биоразнообразия. Это же можно отметить и в отношении видов-индикаторов — на территории наиболее сильного воздействия на фоне критических изменений состояния живых организмов была отмечена высокая численность видов, которые обычно рассматриваются в качестве чувствительных индикаторов загрязнения.

Оценка последствий аварийного химического загрязнения среды

Исследование проводилось спустя год после химического загрязнения среды в результате железнодорожной аварии. Однозначный эффект оцениваемого воздействия был выявлен практически по всем используемым показателям для всех исследованных видов.

По наземным экосистемам нарушение стабильности развития наблюдалось у растений и млекопитающих (до 4–5 балла пятибалльной шкалы отклонений от нормы, “критическое состояние”, $p < 0.01$) (рис. 4–5). У березы повислой это сопровождалось также снижением активности фотосинтеза. Для рыжей полевки и малой мыши — изменением цитогенетических и иммунологических показателей (до уровня четвертого балла, $p < 0.05$).

Для водных экосистем нарушение стабильности развития у рыб (верховка (*Leucaspis delineatus*)) и земноводных (озерная лягушка) свидетельствует о крайне высоком уровне отклонений от нормы (4–5 балл пятибалльной шкалы) у животных, развитие которых происходило в условиях загрязнения (рис. 6). Для земноводных эти изменения сопровождалось изменением показателей цитогенетического гомеостаза и иммунного статуса. Применительно к показателям стабильности развития у рыб можно было оценить последствия изменения ситуации путем сравнения выборок особей разного возраста, взятых в районе

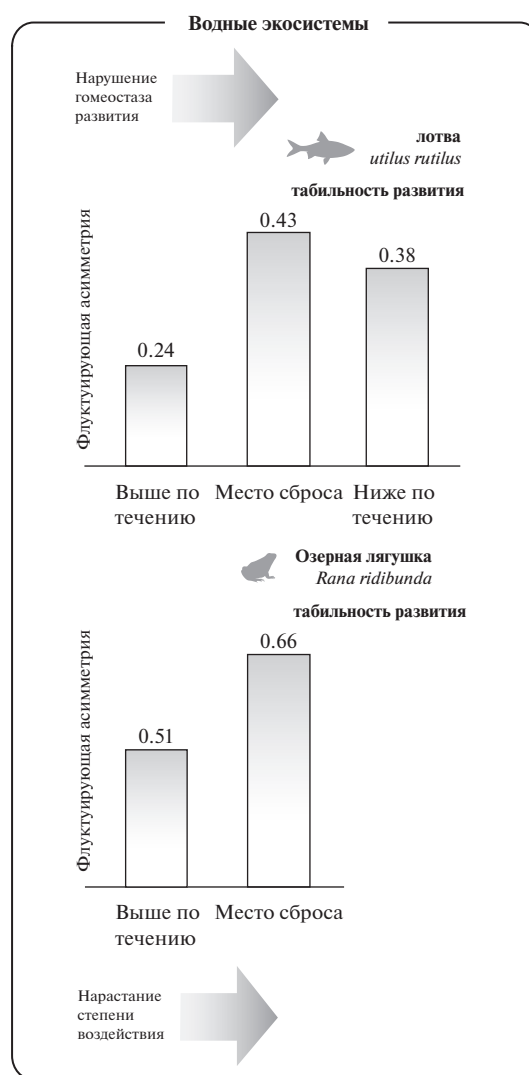


Рис. 3. Величина показателей гомеостаза развития в выборках рыб и земноводных из разных точек в районе центра химической промышленности (г. Чапаевск Самарской области). Стабильность развития рыб оценивалась по величине интегрального показателя: средняя частота асимметричного проявления на признак по шести меристическим признакам. Стабильность развития земноводных оценивалась по величине интегрального показателя: средняя частота асимметричного проявления на признак по тринадцати морфологическим признакам.

аварии. Существенные изменения показателя стабильности развития были выявлены у молодых особей, по сравнению со взрослыми особями, развитие которых проходило в нормальных условиях до аварии ($p < 0.001$). Выявленные свидетельства мутагенного эффекта и изменения иммунного статуса говорят об опасности воздействия, как для живых существ, так и для человека. В данном случае перспективным оказался подход и для экспериментальной оценки качества природных вод и источников питьевого водоснабже-

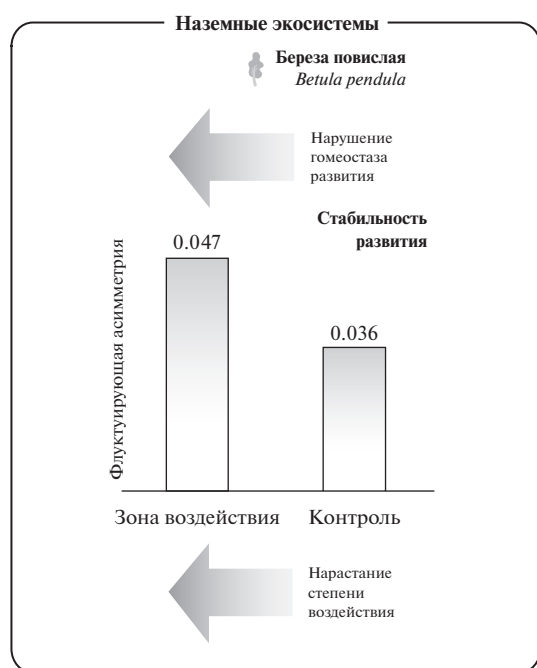


Рис. 4. Величина показателей гомеостаза развития в выборках березы повислой (*Betula pendula*) из разных точек в районе аварийного химического загрязнения среды. Стабильность развития оценивалась по величине интегрального показателя: среднее относительное различие между сторонами на признак по пяти промерам листа.

ния. При высокой токсичности воды в эпицентре аварии, интегральные тесты на состояние цитогенетического гомеостаза (тест на сестринские хроматидные обмены у рыб) и физиологического гомеостаза (тест на экономичность энергетического обмена на дафнии) дали сходный ответ и позволили проранжировать пробы воды по степени воздействия на состояние живого организма. При параллельном исследовании природных водоемов, полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами оценки состояния особей из природных популяций.

В данном случае была получена информация о серьезных последствиях загрязнения окружающей среды для живых существ и человека. Значимость проекта — в демонстрации возможностей подхода для выявления таких последствий не в результате хронического воздействия, что было показано в рамках предыдущего проекта, а вследствие разового воздействия (аварийного химического загрязнения). Адекватность подхода для выявления последствий недавно произошедшей аварии основана на оценке изменений состояния организма в ходе онтогенеза. Целесообразность использования подхода определялась и тем, что в данном случае был неизвестен точный перечень загрязняющих веществ и их количество, попавшее в результате аварии в окружающую среду, а прове-

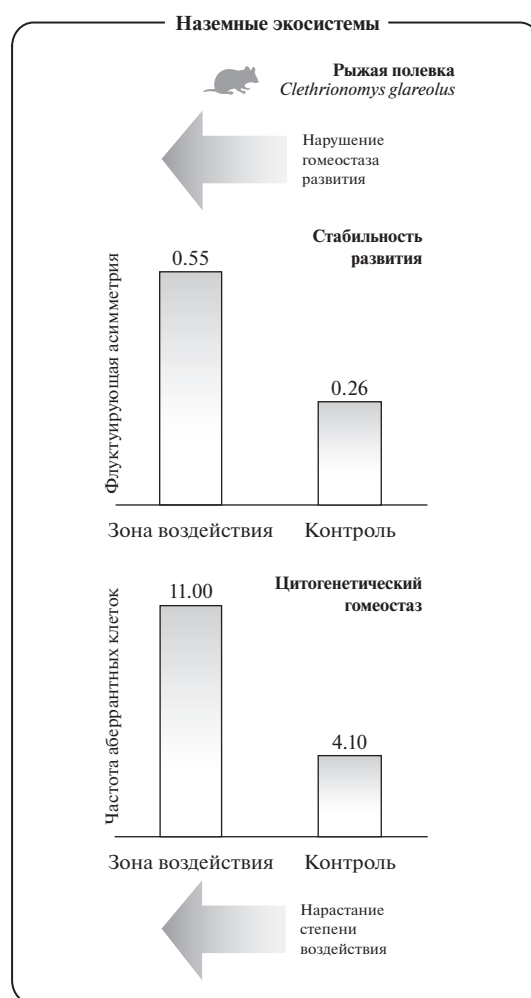


Рис. 5. Величина показателей гомеостаза развития в выборках рыжей полевки (*Clethrionomys glareolus*) из разных точек в районе аварийного химического загрязнения среды. Стабильность развития оценивалась по величине интегрального показателя: средняя частота асимметричного проявления на признак по десяти краниологическим признакам. Цитогенетический гомеостаз оценивался по частоте aberrантных клеток.

дение оценок возможных последствий воздействия загрязнения для здоровья человека иным способом было затруднительно в этом практически ненаселенном районе.

Оценка качества среды в районе радиационного загрязнения

Исследование, проведенное на радиационно загрязненных территориях Брянской области (вследствие аварии на ЧАЭС), показало, что как для наземных, так и для водных экосистем были выявлены отклонения в показателях гомеостаза даже при относительно невысоких уровнях загрязнения.

При отклонении показателей стабильности развития у растений (береза повислая) на уровне

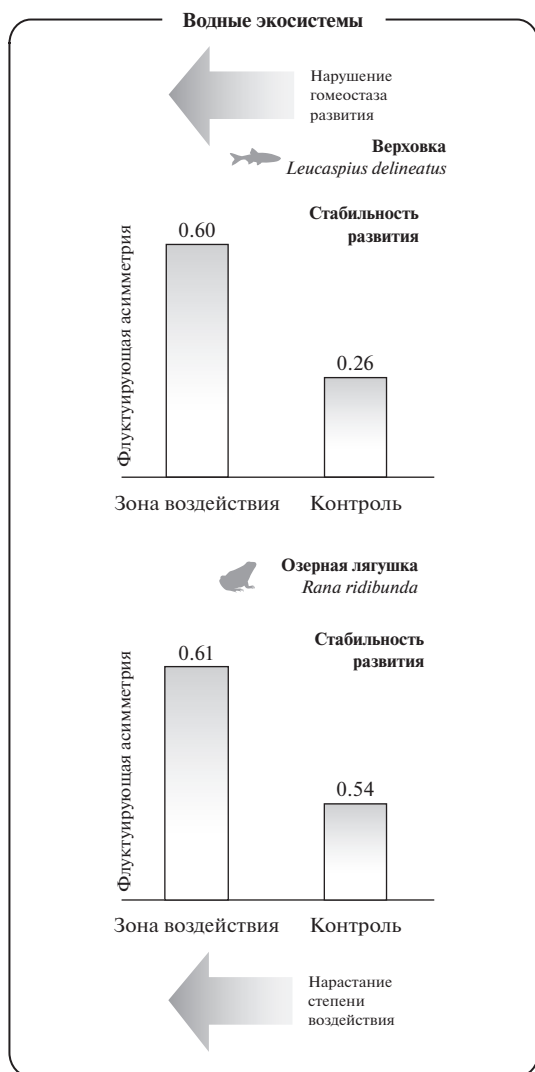


Рис. 6. Величина показателей гомеостаза развития в выборках рыб и земноводных из разных точек в районе аварийного химического загрязнения среды. Стабильность развития рыб оценивалась по величине интегрального показателя: средняя частота асимметричного проявления на признак по восьми меристическим признакам. Стабильность развития земноводных оценивалась по величине интегрального показателя: средняя частота асимметричного проявления на признак по тринадцати морфологическим признакам.

2–3 балла (рис. 7), отклонения показателя для мелких млекопитающих (рыжая полевка) достигали 3–4 баллов ($p < 0.05$) (рис. 8). Причем сходные оценки были получены по пяти видам мелких млекопитающих, как по стабильности развития, так и показателям цитогенетического гомеостаза и иммунного статуса. По показателям цитогенетического гомеостаза отклонения достигали пятого балла ($p < 0.01$). Все эти изменения наблюдались на фоне прежнего биоразнообразия.

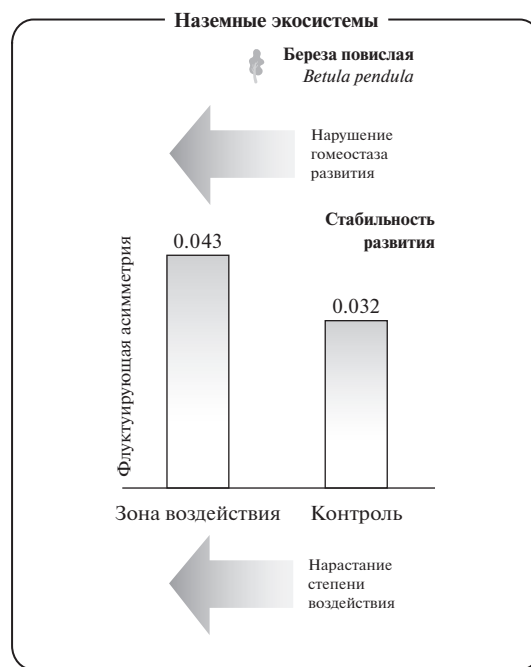


Рис. 7. Величина показателей гомеостаза развития в выборках березы повислой (*Betula pendula*) из разных точек в районе радиационного загрязнения (на территории Брянской области в результате аварии на ЧАЭС). Стабильность развития оценивалась по величине интегрального показателя: среднее относительное различие между сторонами на признак по пяти промерам листа.

По водным экосистемам для рыб (золотой карась (*Carassius carassius*) и земноводных (зеленые лягушки гибридного комплекса (*Rana esculenta*)) отклонения показателя стабильности развития достигали 4–5 баллов ($p < 0.01$) (рис. 9), при частоте фенотипических отклонений у рыб (нарушения нормального строения плавников и жабр) на уровне 30 процентов. Эти отклонения у земноводных сопровождалось изменениями показателей иммунного статуса.

Главный результат проекта — отклонения от нормы по разным показателям для исследованных видов говорят об изменении здоровья среды даже в условиях относительно невысокого уровня радиационного загрязнения. Это свидетельствует о целесообразности использования подхода для ведения мониторинга таких территорий. Предлагаемый подход, ориентированный на оценку чувствительных показателей состояния организма по гомеостазу развития применительно к природным популяциям, представляется наиболее адекватным для решения поставленной задачи — для установления «планки опасности» на уровне необходимом для обеспечения благополучного состояния организма.

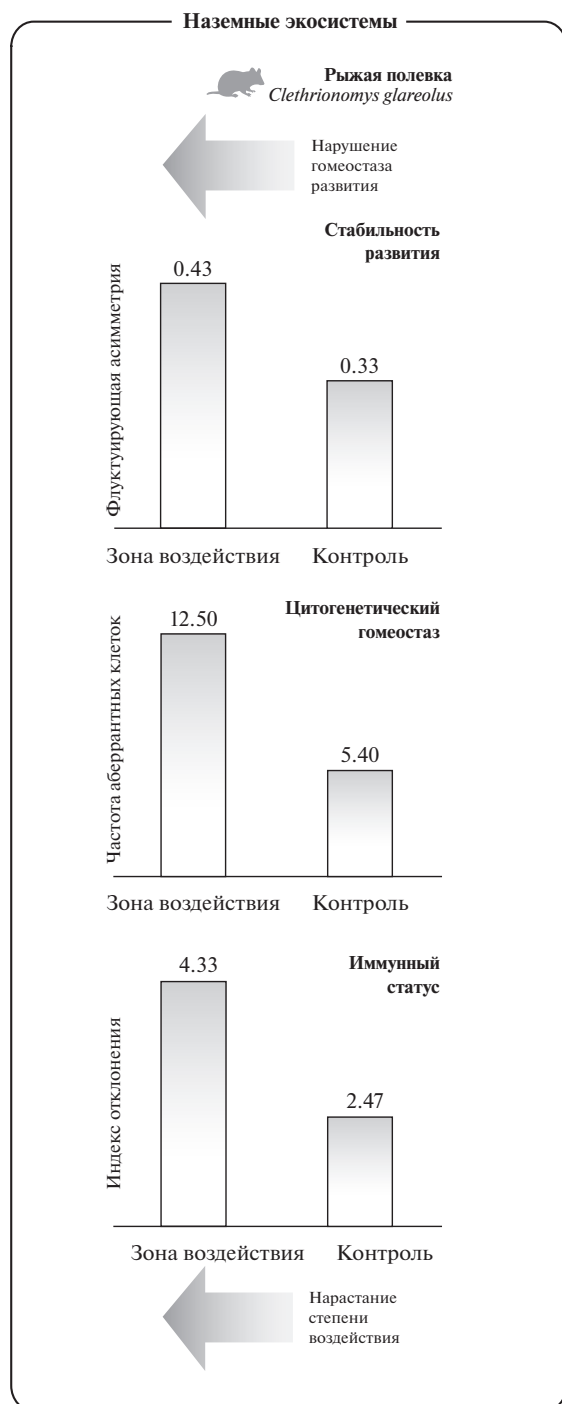


Рис. 8. Величина показателей гомеостаза развития в выборках рыжей полевки (*Clethrionomys glareolus*) из разных точек в районе радиационного загрязнения (на территории Брянской области в результате аварии на ЧАЭС). Стабильность развития оценивалась по величине интегрального показателя: средняя частота асимметричного проявления на признак по десяти краниологическим признакам. Цитогенетический гомеостаз оценивался по частоте aberrantных клеток. Иммунный статус оценивался по величине интегрального индекса отклонений от условной нормы по ряду показателей состояния иммунной системы.

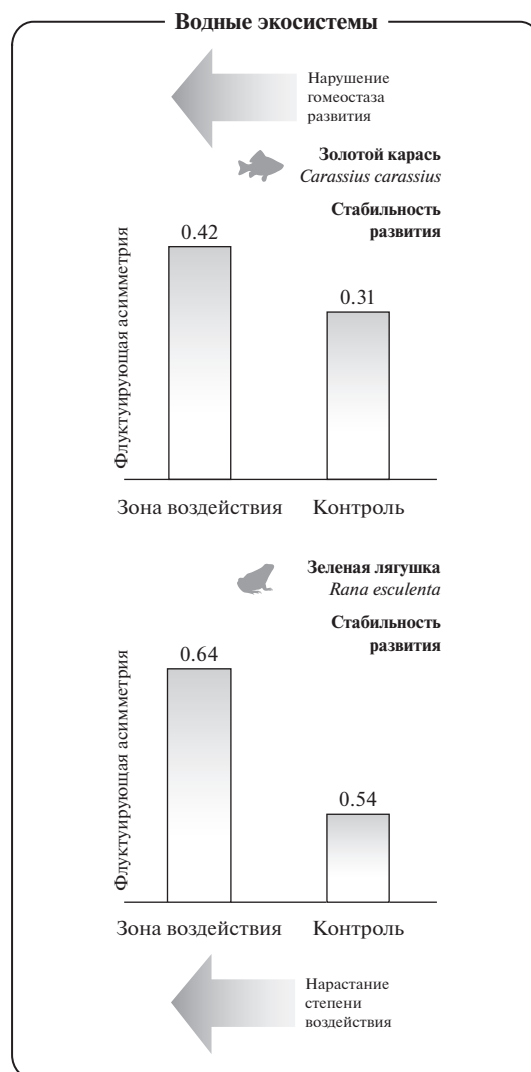


Рис. 9. Величина показателей гомеостаза развития в выборках рыб и земноводных из разных точек в районе радиационного загрязнения (на территории Брянской области в результате аварии на ЧАЭС). Стабильность развития рыб оценивалась по величине интегрального показателя: средняя частота асимметричного проявления на признак по пяти меристическим признакам. Стабильность развития земноводных оценивалась по величине интегрального показателя: средняя частота асимметричного проявления на признак по тринадцати морфологическим признакам.

Оценка влияния неионизирующего радиоманнитного излучения

Сравнение природных популяций на контрольном участке и на экспериментальном участке, подверженном воздействию радара в течение весенне-летних месяцев, позволило выявить эффект воздействия по показателям стабильности развития, как для растений, так и для млекопитающих, а также по иммунным показателям для мелких млекопитающих. Причем и в том, и в другом случае изме-

нения были на уровне 4–5 балла, “критическое состояние” ($p < 0.05$). Если выявленный эффект по физиологическим показателям (параметры фотосинтеза у березы повислой) носил обратимый характер и исчезал через несколько дней после прекращения воздействия, то морфологические изменения имели необратимый характер (во всяком случае для тех признаков, которые формируются на ранних стадиях онтогенеза и не подвержены дальнейшим возрастным изменениям).

Это исследование свидетельствует о возможности выявления последствий при относительно невысоком и кратковременном воздействии неионизирующего излучения (когда выявление последствий такого воздействия при использовании иных подходов затруднительно). Эффект прослеживался на фоне неизменного биоразнообразия. Кроме сходства сообщества мелких млекопитающих, специально проведенное исследование по почвенной фауне не выявило изменений, как в видовом составе, так и численности отдельных видов беспозвоночных.

Оценка качества среды в районе химического предприятия I

Основное направление воздействия в районе припортового предприятия по производству азотных удобрений — атмосферные выбросы и сброс сточных вод после очистки в водоем-накопитель.

Оценка ситуации в отношении наземных экосистем дала следующие результаты. Было выявлено снижение стабильности развития на территории и в непосредственной близости от предприятия, по сравнению с фоновым уровнем на удалении в несколько километров. Эффект был выявлен на двух видах растений (оценка проводилась по отдельным примерам). Такой же результат был выявлен и при оценке показателя стабильности развития (по комплексу морфологических признаков) для двух видов мелких млекопитающих (домовая мышь (*Mus musculus*) и малая белозубка (*Crocidura suaveolens*)). О значимости выявленных различий по стабильности развития свидетельствует и то, что для одного вида такие различия были выявлены и в отношении биохимических и иммунологических показателей. По тем показателям, для которых была разработана балльная шкала, отклонения в исследуемых показателях соответствуют начальной стадии (второй балл), по сравнению с условно фоновым состоянием (который соответствуют первому баллу, условно нормальное состояние). Статистически значимые различия выявляются лишь по отдельным признакам и используемым параметрам. Сходство данных, полученных для растений и млекопитающих, при том что величина используемого интегрального показателя стабильности развития оказывается сходной для представителей столь разных групп

мелких млекопитающих как насекомоядные (малая белозубка) и грызуны (домовая мышь) позволяет говорить о наличии явных последствий оцениваемого воздействия для здоровья среды. В то же время эффект воздействия оказывается не столь значительным и локальным. Такие изменения были выявлены лишь по чувствительным показателям гомеостаза развития, патолого-анатомические исследования не выявили никаких значимых изменений.

Изменения показателей стабильности развития в водоемах в непосредственной близости к предприятию были обнаружены у двух видов насекомых (оценка проводилась по отдельным меристическим признакам).

Иная картина была выявлена при оценке ситуации в водоеме-накопителе сточных вод предприятия после биологической очистки. Там были выявлены серьезные отклонения от нормы по показателям стабильности развития для насекомых и рыб. Отклонения по интегральному показателю стабильности развития у рыб (серебряный карась (*Carassius auratus*)) соответствовали пятому баллу пятибалльной шкалы (критическое состояние) ($p < 0.05$). Эти изменения сопровождались появлением фенотипических отклонений (11 процентов), патолого-анатомических и гистологических отклонений у рыб. Особый интерес полученные данные представляют в связи с тем, что вода, поступающая в этот водоем после биологической очистки, соответствует условной норме (по результатам биотестирования). Ухудшение состояния воды, видимо, связано с эвтрофикацией в этом большом по площади и хорошо прогреваемом неглубоком водоеме. Это вновь свидетельствует о важности проведения таких оценок в природных популяциях для получения информации о реальной ситуации в оцениваемых местообитаниях.

Оценка состояния морских экосистем также выявила существенные отклонения в здоровье среды. Нарушение стабильности развития было отмечено для столь разных фоновых представителей морских экосистем, как черноморская креветка (*Palaemon elegans*) и бычок-зеленчик (*Zosterisessor ophiocephalus*) (отклонения от нормы соответствуют пятому баллу пятибалльной шкалы, “критическое состояние”). Обнаруженный эффект, видимо, прежде всего, связан не с деятельностью предприятия, а с высоким уровнем общего загрязнения в районе порта.

Результат проекта — демонстрация возможности подхода для однозначного выявления последствий даже не столь значительного и локального антропогенного воздействия. Значимость такой оценки и полученных результатов в том, что до ее проведения, с одной стороны, работа предприятия вызывала опасения, а с другой стороны, на основании формальной документации, данных о

сбросах и выбросах предприятия, высказывались сомнения в возможности выявления последствий такого воздействия для биоты и целесообразности проведения такой оценки. Результаты проведенного исследования свидетельствуют о важности проведения таких оценок для получения информации о реальной ситуации, которая не может быть получена на основании иных подходов и оценок степени воздействия на основании формальных показателей.

Оценка качества среды в районе химического предприятия II

Исследование проводилось на серии точек на разном удалении от предприятия по производству азотных удобрений. В районе предприятия отклонения достигают критического состояния, по мере удаления от завода степень выявленных отклонений постепенно снижается.

Для наземных экосистем снижение стабильности развития было отмечено для 4 видов растений и 2 видов насекомых (исследования проводились по отдельным признакам). Для трех видов мелких млекопитающих были выявлены изменения по всем основным показателям гомеостаза развития (включая морфогенетические, цитогенетические, иммунологические показатели и показатели ритмики роста). По показателям, для которых была разработана шкала отклонений (это, прежде всего, интегральные показатели стабильности развития и цитогенетического гомеостаза) эти изменения достигали 5 балла пятибалльной шкалы, “критическое состояние”.

При оценке последствий общего воздействия предприятия на водные экосистемы снижение стабильности развития в водоемах вблизи предприятия было обнаружено у насекомых (стрекоза-стрелка (*Coenagrion puella*)) (оценка проводилась по отдельному признаку), рыб (золотой карась) и земноводных (травяная лягушка (*Rana temporaria*)) (для этого вида была проведена оценка иммунного статуса). По интегральному показателю стабильности развития у рыб и земноводных отклонения соответствовали 4 баллу. При оценке водных экосистем в районе сброса скоррелированные ответы на уровне 3–4 балла были получены по интегральному показателю стабильности развития у двух видов рыб (речной окунь (*Perca fluviatilis*) и щука (*Esox lucius*)) (были также выявлены свидетельства оксидантного стресса по повышению активности супероксиддисмутазы) и земноводных. Токсичность сбросных вод (воды после биологической очистки и условно чистых стоков) также была оценена с использованием показателей гомеостаза развития при экспериментальном биотестировании (включая тесты по цитогенетическому гомеостазу — тест на сестринские хроматидные обмены, и физиологическому

гомеостазу — оценка экономичности энергетического обмена, у рыб).

Значимость результатов этого проекта — в демонстрации возможности выявления существенного изменения здоровья среды, когда ситуация оказывается более серьезной, чем это предполагалось на основании формальных показателей, свидетельствуя о важности подхода для интегральной оценки последствий воздействия всех производств предприятия в течение длительного времени. Это послужило основанием для рекомендации о нецелесообразности запуска дополнительных производств в сложившейся напряженной ситуации, приближающейся к предельно допустимой нагрузке для здоровья среды. В данном случае сильная степень отклонения здоровья среды от нормы наблюдается на фоне высокой продуктивности экосистем и богатого биоразнообразия в связи с высокой эвтрофикацией, вследствие повышенной концентрации соединений азота, которые и являются основной продукцией предприятия.

Сравнение результатов, полученных при оценке последствий воздействия двух химических предприятий (предприятие I и предприятие II) позволяет заключить, что при использовании таких оценок может быть не только выявлен факт изменения здоровья среды в районе воздействия, но и оценена степень такого отклонения от нормы. Если в первом случае (при оценке предприятия I), степень отклонения от нормы соответствовала 2 баллу, то во втором (при оценке предприятия II) — 4–5 баллу пятибалльной шкалы отклонений от нормы, разработанной для ряда используемых подходов для оценки здоровья среды. Причем получаемые оценки оказались сходными у разных видов по разным показателям гомеостаза развития.

Оценка фоновое состояние среды при комплексном антропогенном воздействии

Рекогносцировочная оценка качества среды в низовьях Волги проводилась для наземных и водных экосистем в ряде точек как выше, так и ниже по течению, относительно города Астрахани. Ситуация выше по течению реки относительно города соответствует условной норме. Ниже по течению (порядка 40 км от г. Астрахани) ситуация может быть оценена как критическая, видимо, вследствие воздействия агропромышленного комплекса. Еще ниже по течению реки (порядка 80 км от г. Астрахани) ситуация несколько улучшается, но, по-прежнему, остается напряженной. Этот район представляет собой зону интенсивного сельского хозяйства. Несмотря на некоторые отличия, которые наблюдаются по различным подходам и видам, все основные исследованные параметры изменяются согласованно, позволяя представить картину наблюдаемых изменений здоровья среды даже при такой рекогносцировочной оценке.

При характеристике наземных экосистем два вида млекопитающих (домовая мышь и полевая мышь (*Apodemus agrarius*)) обнаруживают сходную картину изменения различных параметров в исследованных точках, причем интегральные показатели стабильности развития в зоне наибольшего воздействия достигают максимальных значений (пятый балл, “критическое состояние”, $p < 0.05$), сходных у разных видов даже по абсолютной величине. Картина выявленных изменений подтверждается и результатами оценки цитогенетического гомеостаза и иммунного статуса.

При характеристике водных экосистем в общем сходная картина наблюдается как для рыб (плотва и речной окунь), так и земноводных (озерная лягушка) при сходстве результатов оценки стабильности развития, цитогенетического гомеостаза и иммунного статуса. По интегральным показателям стабильности развития выявленные изменения в точках наибольшего воздействия соответствуют 4–5 баллу пятибалльной шкалы отклонений от нормы ($p < 0.001$).

В рамках данного проекта оценка проводилась как рекогносцировочная для характеристики общей ситуации на значительной территории. Опыт реализации проекта свидетельствует о возможности использования подхода для решения задачи, связанной с оценкой общей нагрузки на здоровье среды вне зависимости от конкретных факторов воздействия. В данном случае в разных районах превалирует либо промышленное, либо сельскохозяйственное воздействие. Принципиально сходная картина, полученная для наземных и водных экосистем, открывает возможность использования подхода для оценки здоровья среды для водно-болотных угодий. Опыт выполнения проекта свидетельствует о важности разработанной балльной шкалы для оценки степени отклонения от нормы. По некоторым видам были получены данные лишь по отдельным точкам, но и они при использовании ранее разработанной шкалы балльных оценок хорошо вписались в общую картину выявленных изменений.

Оценка качества среды на урбанизированной территории

Исследование оценок здоровья среды было проведено в ряде районов на территории города Москвы (Захаров и др., 2001). По тем подходам, для которых было возможно использовать разработанную балльную систему оценки, ситуация по разным районам для наземных экосистем варьировала от 2 до 4 балла пятибалльной шкалы отклонений от нормы, для водных экосистем от 2 до 5 балла. Оценка проводилась для наземных экосистем по растениям (береза повислая) и мелким млекопитающим (полевая мышь), для водных экосистем по рыбам (плотва) и земноводным

(озерная лягушка). О значимости оценок свидетельствует согласованность изменения используемых показателей (включая оценки стабильности развития по всем исследуемым объектам, а также показатели цитогенетического гомеостаза в отношении млекопитающих, рыб и земноводных и иммунного статуса в отношении млекопитающих). Выявленный тренд нарастания степени отклонений от условно нормального состояния, в общем, соответствует известной картине нарастания степени экологической нагрузки на территории города (на основании химических и физических анализов и эколого-эпидемиологических оценок).

Этот результат свидетельствует о целесообразности проведения таких оценок в условиях города для характеристики ситуации при всем комплексе самых разных воздействий, имеющих место на урбанизированной территории.

Таким образом, каждый проект вносит свой вклад в формирование картины возможных изменений здоровья среды, что и определяет возможности предлагаемой методологии и используемых при этом подходов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прежде всего, значимость оценок, получаемых при использовании методологии оценки здоровья среды, определяется возможностью характеристики реальной ситуации, которая имеет место на определенной территории (в природных популяциях разных видов) при разных видах антропогенного воздействия. Это химическое загрязнение, ионизирующая радиация, неионизирующее радиомангнитное излучение, а также комплексное воздействие в районах промышленной и сельскохозяйственной активности и на урбанизированных территориях. В этом и состоит назначение подхода, поскольку оценка всех загрязняющих веществ и видов воздействия оказывается затруднительной, а предсказание и моделирование кумулятивного эффекта их возможных сочетаний не представляется возможным вовсе. Как показал опыт проведенных оценок, существенные изменения здоровья среды могут наблюдаться на фоне прежнего или даже возросшего, в силу определенных причин, биоразнообразия и высокой продуктивности экосистем.

Реальная ситуация, которая может быть выявлена при таком подходе, может оказаться как хуже, так и лучше того заключения, которое можно сделать на основании анализа формальных данных по степени воздействия или при использовании иных подходов.

При этом появляется возможность для выявления последствий как хронического, так и разового воздействия, как на локальном уровне, так и на уровне значительных территорий. Получаемая

информация, связанная с оценкой гомеостаза развития в природных популяциях при разных видах воздействия, представляет практический интерес и может быть использована для выделения зон экологического неблагополучия (даже на фоне сохранения прежних экосистем и биоразнообразия), экологического нормирования и определения предельно допустимой нагрузки.

При таком подходе возможна оценка последствий разных воздействий в отношении разных видов животных и растений, разных типов экосистем. Такой анализ может дать необходимую информацию о качестве среды даже в тех случаях, когда точный перечень загрязняющих веществ и других видов воздействия остается неопределенными. При этом может быть получена ориентировочная информация и о благоприятности среды для здоровья человека. В целом, такая оценка, давая характеристику благоприятности среды для живых существ и человека, представляет как теоретический, так и практический интерес, определяет формирование нового подхода к сохранению живой природы, обращая внимание на важность не только поддержания численности разных видов, но и на их благополучие.

Методология оценки здоровья среды представляет собой не просто еще один метод, а принципиально иной подход, в результате которого вместо обычной мозаики ответов по различным биологическим показателям может быть получен интегрированный ответ по разным подходам оценки гомеостаза развития, что и позволяет подойти к характеристике состояния разных видов живых существ. Ее значимость — в возможности оценки реальной ситуации в природе, которая не может быть получена в ходе лабораторных экспериментов.

Дальнейшее развитие методологии, основанной на оценке гомеостаза развития в природных популяциях, видимо, должно быть связано с совершенствованием методов и конкретных показателей, которые используются в рамках ее основных подходов.

Как показал проведенный анализ, предлагаемая методология оценки здоровья среды, основанная на оценке гомеостаза развития, в силу ряда особенностей, по сравнению с другими возможными подходами для решения этой задачи, соответствует основным требованиям современной системы мониторинга качества среды, связанного с характеристикой благоприятности условий для живых существ и человека, включая интегральность и значимость получаемых оценок, чувствительность используемых показателей и универсальность подхода по отношению к видам живых существ и к видам воздействия. Применительно к исследованию гомеостаза развития, опыт проведенных оценок дает информацию о диапазоне возможных изменений этой характеристики в природных популяциях при различных видах воздействия.

Существуют две возможности использования методологии: в отношении районов, представляющих особый интерес, целесообразно использование различных подходов; для быстрого сканирования возможно использование сокращенной, но эффективной для ориентировочной оценки ситуации, системы, ограниченной наиболее доступными методами (основанными, главным образом, на морфогенетических показателях), пригодными для широкого использования.

Использование системы в полном объеме, включающей четыре уровня интегрирования результатов (по всем методам в пределах каждого базового подхода; по всем подходам для каждого вида; по каждой группе видов живых существ; по экосистеме в целом), представляется целесообразной для получения более надежной интегральной оценки благополучия окружающей среды.

Основанием для возможности использования морфогенетических методов при рекогносцировочной оценке ситуации служит опыт использования методологии в лаборатории и в природе. Практически во всех случаях, изменения в гомеостазе развития, фиксируемые при использовании различных подходов (включая генетические, физиологические, биохимические и иммунологические) сопровождаются изменениями морфогенетических показателей. Это позволяет рекомендовать морфогенетические методы в качестве операционального и доступного для широкого использования подхода для получения первых ориентировочных оценок.

Методика оценки здоровья среды, как оценка состояния природных популяций по стабильности развития, была разработана применительно к разным видам животных и растений, апробирована при оценке наземных и водных экосистем при разных видах антропогенного воздействия и рекомендована для биоиндикации качества среды (распоряжением МПР РФ № 460-р от 16 октября 2003 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вопросы экологического нормирования и разработка системы оценки состояния водоемов: Материалы Объединенного Пленума Научного совета ОБН РАН по гидробиологии, Гидробиологического общества при РАН и Межведомственной ихтиологической комиссии. / Под ред. Павлова Д.С., Розенберга Г.С., Шатуновского М.И. М.: Тов-во научных изданий КМК, 2011. 196 с.
- Биотест: интегральная оценка здоровья экосистем и отдельных видов. / Под ред. Захарова В.М., Кларка Д.М. М.: Московское Отделение Международного Фонда "Биотест", 1993. 68 с.
- Захаров В.М. Асимметрия животных: популяционно-феногенетический подход. М.: Наука, 1987. 216 с.
- Захаров В.М., Жданова Н.П., Кирик Е.Ф., Шкиль Ф.Н. Онтогенез и популяция: оценка стабильности раз-

- вития в природных популяциях // Онтогенез. 2001а. Т. 32. № 6. С. 404–421.
- 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.: ЦЭПР, 2000. 320 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.: ЦЭПР, 2001б. 67 с.
- Орджоникидзе К.Г., Демидова Т.Б., Крысанов Е.Ю. Способы оценки цитогенетического гомеостаза в природных популяциях животных на разных этапах онтогенеза // Онтогенез. 2014. Т. 45. № 3. С. 170–179.
- Biomarkers: A Pragmatic Basis for Remediation of Severe Pollution in Eastern Europe / Eds. Peakall D.B., Walker C.H., Migula P. Springer Netherlands, 1999. 324 p.
- Broom D.M., Johnson K.G. Stress and Animal Welfare. London, Chapman & Hall, 1993. 211 p.
- Broom D.M. Welfare in relation to feelings, stress and health // REDVET. Revista electrónica de Veterinaria 1695–7504 2007 Volumen VIII Número 12B. 2007. <http://www.veterinaria.org/revistas/redvet/n121207B.html>.
- Clarke G.M. Relationships between development stability and fitness: application for conservation biology // Conserv. Biol. 1995. V. 9. P. 18–24.
- Conservation Medicine: Ecological Health in Practice / Eds. Aguirre A.A., Ostfeld R.S., Tabor G.M., House C., Pearl M.C. New York: Oxford University Press, 2002. 408 p.
- Developmental Homeostasis in Natural Populations of Mammals: Phenetic Approach / Eds. Zakharov V.M., Yablokov A.V. Acta Theriologica Suppl. 4. Bialowieza (Poland): Polish Academy of Sciences, 1997. 92 p.
- Developmental Instability: Its Origins and Evolutionary Implications / Ed. Markow T.A. Dordrecht et al.: Kluwer Acad. Publ., 1994. 444 p.
- Developmental Stability in Natural Populations / Eds. Zakharov V.M., Graham J.H. Acta Zoologica Fennica. 1992. № 191. 200 p.
- Kendall R.J. Wildlife Toxicology: Where we have been and where we are going // J. Environ. Anal. Toxicol. 2016. 6: 348. doi 10.4172/2161-0525.1000348
- Palmer A.R., Strobeck C., Chippindale A.K. Bilateral Variation and the Evolutionary Origin Macroscopic Asymmetries. Developmental Instability: Its Origins and Evolutionary Implications. Dordrecht et al.: Kluwer Acad. Publ., 1994. P. 203–220.
- Peakall D.B. Animal Biomarkers as Pollution Indicators. Chapman & Hall, 1992. 292 p.
- Soule M.E. Phenetics of natural populations. II. Asymmetry and evolution in a lizard // Amer. Natur. 1967. V. 101. P. 141–160.
- Valentine D.W., Soule M.E. Effect of p,p'-DDT on developmental stability of pectoral fin rays in the grunion *Leuresthes tenuis* // Nat. Mar. Fish. Bull. 1971. V. 71. P. 921–925.
- Wildlife Toxicology: Emerging Contaminant and Biodiversity Issues / Eds. Kendall R.J., Lacher T.E., Cobb G.P., Cox S.B. CRC Press, 2010. 322 p.
- Zakharov V.M. Linking developmental stability and environmental stress: A whole organism approach // In: Developmental Instability. Causes and Consequences / Ed. Michal Polak. New York. Oxford University Press, 2003. P. 402–414.

Study of Environment Homeostasis in Natural Populations. Environmental Health Concept: Methodology and Practice of Estimation

V. M. Zakharov¹, E. Yu. Krysanov², A. V. Pronin³, and I. E. Trofimov^{1, *}

¹ Koltzov Institute of Developmental Biology, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia

² Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119071 Russia

³ Gamaleya Scientific Research Institute of Epidemiology and Microbiology,
Ministry of Health of Russia, Moscow, 123098 Russia

*e-mail: ecopolicy@ecopolicy.ru

Received June 22, 2017

Increasing anthropogenic effect on the natural environment determines the topicality and significance of provision of the all-round estimation and monitoring of its consequences. The methodology of the environmental health estimation based on characteristics of the state of different species of living creatures according to the development homeostasis is proposed as an operational approach for this problem solution. The conducted methodology approbation during the execution of a number of the projects on the estimation of the environmental quality under different types of the anthropogenic effect allows one to characterize the possibilities of used approaches for estimation of the environment's auspiciousness for living creatures and humans. This also opens up the possibility to estimate the range of possible changes of the development homeostasis in real natural conditions.

Keywords: development homeostasis, natural populations, environmental health