

Флуктуирующая асимметрия в комплексном эколого-биогеохимическом мониторинге хвостохранилища

© 2021. С. Ф. Тютиков, д. б. н., с. н. с., в. н. с.,
 В. В. Ермаков, д. б. н., профессор, г. н. с., А. П. Дегтярёв, н. с.,
 В. Н. Данилова, н. с., У. А. Гуляева, м. н. с.,
 Институт геохимии и аналитической химии
 им. В. И. Вернадского Российской академии наук,
 119991, Россия, г. Москва, ул. Косыгина, д. 19,
 e-mail: tyutikov-sergey@rambler.ru

Наряду с развитием современных методов экологического тестирования значима оценка возможностей комплексного эколого-биогеохимического мониторинга объектов накопленного экологического вреда (хвостохранилищ). Помимо непосредственного определения уровней токсикантов в объектах окружающей среды и биоты всё чаще применяются методы морфометрии, например, расчёт флуктуирующей асимметрии. В районе Унальского хвостохранилища (Северная Осетия) определяли флуктуирующую асимметрию листьев берёзы пушистой, содержание в них Pb, Cd, Zn, Cu, хлорофиллов *a* и *b*, каротина, цистеина, металлотioneинов и цистеина. Выявлена высокая положительная корреляция между содержанием свинца и флуктуирующей асимметрией листьев. Корреляция между содержанием суммы металлов в почвах и растениях, содержанием глутатиона и металлотioneинов в экстрактах листьев берёзы, с одной стороны, и флуктуирующей асимметрией, с другой, оказалась умеренно положительной.

Ключевые слова: флуктуирующая асимметрия, эколого-биогеохимический мониторинг, глутатион, металлы, металлотioneины, фитохелатины.

Fluctuating asymmetry in the integrated environmental and biogeochemical monitoring of the tailings dam

© 2021. S. F. Tyutikov ORCID: 0000-0001-9076-1759,
 V. V. Ermakov ORCID: 0000-0003-2457-2831, A. P. Degtyaryov ORCID: 0000-0002-2668-8427,
 V. N. Danilova ORCID: 0000-0003-3308-8443, U. A. Gulyaeva ORCID: 0000-0001-5585-903X,
 Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry,
 19, Kosyгина St., Moscow, Russia, 119991,
 e-mail: tyutikov-sergey@rambler.ru

The assessment of opportunities of various methods of complex ecologo-biogeochemical monitoring of objects of the accumulated environmental damage (tailings dams) in modern biospheric conditions is very significant. Organisms of different levels of the organization are applied: from infusorians to the highest mammals and the human body. In addition to direct determination of levels of toxicants in organism researchers often use their morphometric parameters, in particular – the fluctuating asymmetry. Calculation of this parameter for sheet plate of the birch growing near the Unalsky tailings dam (North Ossetia) was compared to determination of biologically active sulfur-containing components (metallothioneins, glutathione, cysteine) and pigments (a-chlorophyll, b-chlorophyll, carotene). In the technogenic horizons of urbozem and natural soils, leaves and hay crops of plants the content of microelements is found. In soils and urbozem it is revealed: Pb – 10.5–589, Cu – 7.0–891, Zn – 23–4156, Cd – 0.2–91, As – 5–18.8, Se – 0.05–4.6 mg/kg. High positive correlation between the content of Pb in soils and asymmetry of birch leaves ($r = 0.89$) is established. On other metals correlation was low ($r = 0.18–0.24$). Floristic inspection found noticeable decrease in phytovariety and biomass on technogenic platforms. Value of the fluctuating asymmetry is moderately correlated with amount of metals in soils and leaves. The same relation is found between its value and content of glutathione and metallothionein in extracts of birch leaves. Correlation with levels of pigments (a-chlorophyll and carotenoids) was not observed. Comparison of the fluctuating asymmetry of leaves of white birch with the total content of metals and the concentration in water extract confirms certain correlation between these parameters. Higher concentration of the sum of metals and sulfur-containing biologically active agents is followed by increase in value of asymmetry.

Keywords: fluctuating asymmetry, ecological and biogeochemical monitoring, glutathione, metals, metallothioneins, phytochelatin.

На современном этапе развития биосферы статус химических элементов в её абиотических компонентах и биоте становится одним из важнейших факторов, оказывающих как прямое, так и опосредованное влияние на популяции живых организмов, определяющих качество среды их обитания и обуславливающих в конечном итоге антропогенную микроэволюцию [1]. Наряду с развитием экологического тестирования [2], очевидным является значимость оценки возможностей различных методов комплексного эколого-биогеохимического мониторинга (ЭБГХМ) объектов накопленного экологического вреда, в частности, хвостохранилищ пульпы горнообогатительных комбинатов. Важным результатом применения методов ЭБГХМ в экотоксикологии служит выход на изучение закономерностей перехода индивидуальных изменений химического состава отдельных организмов, проявляющихся в экстремальных геохимических условиях, к популяционным и биоценотическим [3], а также разработка подходов к «свёртыванию информации» [4]. Применительно к нашей теме, следует остановиться на использовании морфометрических параметров организмов, применяемых для интегрированной оценки экологического состояния объектов накопленного экологического вреда.

Среди других подходов к оценке экологического состояния загрязнённых территорий широко используют измерение флуктуирующей асимметрии (ФА) у различных организмов [5–7]. Имеются данные о низкой эффективности метода [8–11] в условиях умеренного загрязнения. Установлено определённое влияние на параметры ФА растений стадии вегетации, возраста и микроклиматических факторов [12, 13]. Некоторые виды реагируют на запылённость увеличением ФА листьев [14]. В работе [15] в условиях слабого загрязнения среды металлами не выявлено чёткой связи между показателем ФА берёзы повислой и накоплением в листьях ТМ.

Целью настоящей статьи является оценка возможности использования ФА листовой пластины берёзы пушистой (*Betula pubescens* L.) в комплексном ЭБГХМ объектов накопленного экологического вреда на примере Унальского хвостохранилища (УХ) в Республике Северная Осетия – Алания.

Материалы и методы исследования

Исследования растений, произрастающих на территориях с различной степенью антропо-

генного воздействия, выполнены в 2019 г. по традиционной биогеохимической (БГХ) схеме, включающей комплексное исследование и отбор проб почв и растений на стационарных площадках. Исследования были сосредоточены на 8 площадках с различной степенью загрязнения ТМ. Это площадки 2 и 3 на дамбе УХ и площадки 1, 4, 5 и 6, которые находятся на различном расстоянии от этого источника загрязнения металлами. Условно фоновые площадки 7 и 8 расположены в Зарамагской котловине (верхняя часть Ардонского ущелья) и выше с. Бурон. Здесь сформировались мезофитные разнотравные луга. Высота над уровнем моря составляет около 930–990 м.

На каждой площадке осуществляли общепринятые флористические и геоботанические исследования. С каждого дерева берёзы отбирали по 80 листьев с 4-х сторон (север, юг, запад, восток) на высоте 1,8–2 м с максимального количества доступных веток. После отбора листьев в этот же день проводили измерения – определение 5 параметров, среднее относительное различие на признак и степень ФА [16]. Расчёт величины ФА проводили по общепринятой методике [17] с помощью оригинальной программы [18], а сравнение с фоновыми территориями – на основании базы данных [19].

Листья берёзы экстрагировали смесью метилового спирта и 0,1М фосфатного буфера (рН 6,8) для определения металлотиионеинов, глутатиона и цистеина, а затем определяли посредством жидкостной хроматографии низкого давления в виде флуоресцентных производных после реакции с N-9-(акридинил)-малеимидом (НАМ). Растительные пигменты экстрагировали этанолом и определяли спектрофотометрически на СФ-320 («Хитачи») по методике [20]. Для определения водорастворимой фракции ТМ листья экстрагировали дистиллированной водой в течение 6 ч на холоду. Содержание ТМ определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии в пламенном и беспламенном вариантах на приборах ООО «КОРТЭК», используя стандартные образцы растений и почв. Количественное определение металлов, пигментов и фитохелатинов проводили в трёх повторностях из разных навесок.

Результаты и обсуждение

В естественных и техногенных почвах в непосредственной близости к УХ содержание ТМ оказалось закономерно высоким (табл. 1). Градиент концентраций метал-

Таблица 1 / Table 1

Содержание металлов и суммы металлов (ΣMe) в почвах (в числителе) и листьях берёзы (в знаменателе) в пределах Унальской котловины и фоновых участков (в мг/кг сухого вещества)
The content of metals and the amount of metals (ΣMe) in the soils (in the numerator) and birch leaves (in the denominator) of the Unal basin and background areas (in mg/kg of dry matter)

№ No.	Место отбора Place of selection	Тип почвы, горизонт Soil type, horizon	Содержание металлов Content of metals				
			Cu	Pb	Zn	Cd	ΣMe
Загрязнённые почвы Унальского хвостохранилища / Contaminated soils Unal Tailings							
1	База МГУ, горный луг / MSU base, mountain meadow	горная лугово-степная Av 0–8 см / mountain meadow-steppe Av 0–8 cm	$46,8 \pm 3,3$ $5,7 \pm 0,4$	$44,6 \pm 4,0$ $4,1 \pm 0,4$	285 ± 29 107 ± 10	$1,1 \pm 0,2$ $0,3 \pm 0,1$	387 ± 30 117 ± 9
2	Дамба УХ / Unal Tailings Dam	технозём 0–12 см technozem 0–12 cm	187 ± 9 $12,9 \pm 0,7$	280 ± 25 $24,3 \pm 1,2$	589 ± 59 1776 ± 18	$3,2 \pm 0,2$ $11,9 \pm 0,6$	1059 ± 82 1825 ± 141
3	Северо-восточная часть УХ / North-East part of the Unal Tailings Dam	технозём 0–10 см technozem 0–10 cm	892 ± 45 $9,5 \pm 0,5$	589 ± 53 $33,7 \pm 3,0$	4156 ± 42 600 ± 60	$91,0 \pm 4,6$ $6,1 \pm 0,3$	5728 ± 444 649 ± 50
4	500 м южнее УХ 500 m south of the Unal Tailings Dum	аллювиальная AdA ₁ 0–10 см alluvial AdA ₁ 0–10 cm	127 ± 6 $8,9 \pm 0,5$	259 ± 23 $31,8 \pm 2,9$	1002 ± 100 403 ± 40	$7,0 \pm 0,4$ $3,9 \pm 0,2$	1396 ± 108 448 ± 35
6	У подножья горы At the foot of the mountain	аллювиальная AdA ₁ 0–12 см alluvial AdA ₁ 0–12 cm	$52,4 \pm 2,6$ $12,5 \pm 0,6$	174 ± 16 $19,8 \pm 1,8$	444 ± 44 305 ± 31	$8,9 \pm 0,4$ $1,7 \pm 0,1$	679 ± 53 339 ± 26
7	На склоне горы On the side of the mountain	горно-луговая Av 0–10 см mountain meadow Av 0–10 cm	$73,2 \pm 3,7$ $9,0 \pm 0,5$	234 ± 21 $16,5 \pm 1,5$	296 ± 30 345 ± 35	$2,6 \pm 0,1$ $7,3 \pm 0,4$	606 ± 50 378 ± 29
Фоновые почвы / Background soils							
8	Посёлок Зарамаг Zaramag village	горная лугово-степная Av 0–10 см	$7,0 \pm 0,4$ $6,9 \pm 0,4$	$13,0 \pm 1,2$ $4,5 \pm 0,4$	60 ± 6 144 ± 14	$0,20 \pm 0,01$ $0,50 \pm 0,03$	81 ± 6 156 ± 12
9	Посёлок Бурон Buron village	mountain meadow-steppe Av 0–10 cm	$14,6 \pm 0,7$ $6,5 \pm 0,3$	$10,5 \pm 0,9$ $2,9 \pm 0,3$	$23,3 \pm 2,3$ 157 ± 16	$0,40 \pm 0,02$ $0,30 \pm 0,02$	49 ± 4 167 ± 13

лов по экспериментальным площадкам: $3 > 4 > 2 > 6 > 7 > 1 > 8 > 9$. Высокое содержание ТМ на площадке 4 объясняется преобладающими ветрами, дующими вверх по ущелью и дефляцией пульпы с поверхности УХ.

Градиент концентраций металлов в почвах отражается на их содержании в растениях (табл. 1). Анализ листьев берёзы показал отражение градиента концентраций металлов и их суммы на обследованных площадках с незначительным изменением порядка: $2 > 3 > 4 > 7 > 6 > 9 > 8 > 1$. Сильная положительная корреляция установлена между содержанием свинца в почвах и листьях берёзы ($r = 0,89$). Это связано с очень высоким содержанием этого металла в пульпе УХ (от 1137 до 1878 мг/кг). По другим металлам корреляция была слабой ($r = 0,18-0,21$). Листья берёзы, отобранные на удалении от дамбы, по содержанию ТМ приближаются к условно фоновым участкам, но содержание цинка остаётся вы-

соким в результате специфического аккумуляирования микроэлемента.

В таблице 2 представлены данные по общему содержанию и водорастворимым формам ТМ в листьях берёзы. В условиях загрязнения (в районе дамбы УХ – площадки 2 и 3), а также на прилегающих территориях (площадки 1, 4, 5 и 6), несмотря на их удалённость от хранилища пульпы (до 1,5–2 км), содержание ТМ в водной вытяжке высокое. Оно изменяется от 16 до 40,2% (от общего содержания). При этом на фоновых участках (площадки 7 и 8) содержание суммы водорастворимых форм металлов составляет 6,2–6,5% от общего содержания.

Флористическое обследование экспериментальных площадок показало заметное снижение числа обитаемых видов растений на техногенных участках (площадки 2 и 3). Общее количество видов здесь не превышало 30, в то время как на площадках 1, 5 и 6 оно достигало 47–56 видов на 100 м². Снижалась

Таблица 2 / Table 2

Извлекаемое водой содержание металлов в листьях берёзы пушистой *Betula pubescens* (мг/кг)
The metal content extracted by water in the leaves of the white birch *Betula pubescens* (mg/kg)

№ No.	Pb		Cd		Cu		Zn		ΣMe	ΣMe-Э ΣMe-E	%Э %-E
	Э / E	%	Э / E	%	Э / E	%	Э / E	%			
1	0,30± 0,07	4,4± 0,4	0,28± 0,01	17,5± 0,9	0,64± 0,03	5,6± 0,3	34,0± 3,4	15,9± 1,6	118± 9	35,0± 2,8	29,7± 2,3
2	4,13± 0,37	6,8± 0,6	1,28± 0,06	4,30± 0,22	2,30± 0,12	3,3± 0,2	385± 39	8,7± 0,9	1825± 141	393± 30	21,5± 1,7
3	2,34± 0,21	6,9± 0,6	0,82± 0,04	13,7± 0,7	0,64± 0,03	6,7± 0,3	178± 18	13,0± 1,3	649± 50	182± 14	28,0± 2,2
4	3,21± 0,29	5,4± 0,5	0,12± 0,01	6,7± 0,3	1,15± 0,06	6,8± 0,3	115,0± 11,5	15,1± 1,5	445± 35	119± 9	22,6± 1,8
6	2,16± 0,19	5,5± 0,5	0,050± 0,003	3,3± 0,2	1,12± 0,06	4,5± 0,2	51,1± 5,1	84± 8,4	339± 26	54,1± 4,2	16,0± 1,2
7	0,19± 0,02	1,30± 0,12	0,39± 0,02	3,2± 0,2	0,85± 0,04	5,6± 0,3	150± 15	26,0± 2,6	370± 29	152± 12	40,2± 3,1
8	0,15± 0,01	3,30± 0,30	0,020± 0,001	4,0± 0,2	0,12± 0,01	1,4± 0,1	9,1± 0,9	6,3± 0,6	156± 12	9,4± 0,7	6,2± 0,5
9	0,12± 0,01	4,1± 0,37	0,010± 0,001	3,3± 0,2	0,15± 0,01	2,3± 0,1	10,3± 1,0	6,6± 0,7	167± 13	10,6± 0,8	6,5± 0,5

Примечание: Э – содержание металла, экстрагируемого водой, % – процент извлечения от общего содержания металла в листьях берёзы, ΣMe – сумма общего содержания металлов, мг/кг, ΣMe-Э – общая сумма экстрагируемых металлов, мг/кг, %-Э – процент извлечения всех металлов от их общего содержания в листьях берёзы.

Note: E – the content of metal extracted by water, % – the percentage of extraction of the total metal content in birch leaves, ΣM – the sum of the total metal content, mg/kg, ΣMe-E – the total amount of extracted metals, mg/kg, %-E – the percentage of extraction of all metals from their total content in the leaves of the white birch.

Таблица 3 / Table 3

Содержание суммы металлов в почвах и растениях, общего глутатиона, МТ и пигментов в листьях берёзы и корреляция флуктуирующей асимметрии с металлами, фитохелатинами и пигментами
The content of the sum of metals in soils and plants, total glutathione, MT and pigments in birch leaves and the correlation of fluctuating asymmetry with metals, phytochelatins and pigments

№ No.	ФА FA	ΣMe_ почва ΣMe_ soil	ΣMe_ листья ΣMe_ leaves	Гл Gl	ΣMT ΣMT	Хл. а Ch. a	Хл. б Ch. b	ΣКар ΣCar
1	0,0498±0,0209	387±43	117±11	18,5±1,7	12,6±0,9	1,7±0,1	0,6±0,1	0,59±0,10
2	0,0547±0,0163	1059±92	1825±23	56,7±4,4	25,5±3,0	2,3±0,4	0,4±0,1	0,64±0,07
3	0,0539±0,0214	5728±588	649±75	19,8±2,2	21,1±2,9	1,3±0,2	0,4±0,1	0,38±0,04
4	0,0472±0,0179	1396±121	448±39	27,4±1,9	17,4±2,3	2,1±0,3	0,8±0,1	0,63±0,09
6	0,0423±0,0167	679±92	339±48	19,5±1,7	14,8±2,2	2,0±0,4	0,7±0,1	0,51±0,08
7	0,0446±0,0212	606±78	378±41	25,1±1,3	12,6±1,8	1,7±0,2	0,6±0,1	0,59±0,08
8	0,0454±0,0054	81±10	156±18	11,2±0,8	25,5±3,0	2,3±2,8	0,4±0,1	0,64±0,08
9	0,0423±0,0032	49±6	167±18	10,4±0,6	21,1±3,2	1,2±0,2	0,4±0,1	0,38±0,05
	r	+0,60	+0,70	+0,63	+0,80	+0,10	-0,34	+0,11

Примечания: ФА – значение параметра флуктуирующей асимметрии, ΣMe_ почва – сумма металлов в почве, ΣMe_ листья – сумма металлов в листьях, Гл – содержание общего глутатиона в листьях, МТ – содержание металлотионеинов в листьях, Хл. а – хлорофилл а, Хл. б – хлорофилл б, ΣКар – сумма каротиноидов. Содержание металлов в почве и листьях в мг/кг воздушно-сухой массы. Содержание Гл, МТ и пигментов в мг/кг сырого вещества; r – коэффициент корреляции между ФА и другими параметрами.

Notes: FA – value of parameter of the fluctuating asymmetry, ΣMe_soil – the sum of metals in the soil, ΣMe_leaves – the sum of metals in leaves, Gl – the sum of glutathione in leaves, MT – the content of metallotioneins in leaves, Ch. a – chlorophyll a, Ch. b – chlorophyll b, ΣCar – the sum of carotenoids. The content of metals in the soil and leaves in mg/kg of air-dry mass. Content of Gl, MT and pigments in mg/kg of fresh material; r correlation coefficient between FA and other parameters.

также общая биомасса укоса с 1 м². Проективное покрытие на наиболее загрязнённых площадках снижалось до 5–10% по сравнению с фоном (площадки 8 и 9).

Данные по ФА листьев берёзы пушистой представлены в таблице 3. Значения колеблются значительно у деревьев с наиболее загрязнённых площадок и даже для одного и того же дерева. Максимальное значение ФА наблюдается для листьев берёзы на площадке 3, около сливной трубы из хвостохранилища, в 50–60 м от его бетонной стены. При этом для листьев, отобранных с восточной стороны, ФА наибольшая. Подобное явление наблюдается и на площадке 1, где содержание металлов в почвах и листьях берёзы относительно низкое. Видимо, это связано с неодинаковой освещённостью растений. И в том, и в другом случае берёзы затенены со стороны наибольшего значения ФА. В первом случае это происходит от соседних деревьев, а во втором – от стены здания. Минимальный уровень ФА листьев берёзы отмечен для фоновых площадок (8 и 9), не испытывающих влияния хвостохранилища. Полученные для этих участков значения ФА выше величин, характерных для фоновых регионов Центральной России [9].

Следует заметить, что достоверных отличий значений ФА листьев берёзы между различными площадками не наблюдалось из-за высоких отклонений от среднего значения в условиях загрязнения. Только в одном случае была выявлена существенная разница значений ФА между площадками 2 (УХ) и 9 (фон).

Были определены коэффициенты корреляции между ФА листьев берёзы, содержанием суммы металлов в почвах и листьях, а также уровнями пигментов и хелатинов (табл. 4). Оказалось, что значение ФА умеренно коррелирует с суммой металлов в почвах и листьях. Такая же связь обнаружена с содержанием глутатиона и металлотioneинов в экстрактах. Относительно пигментов (хлорофилл *a*, хлорофилл *b* и каротиноиды) и ФА корреляции не наблюдалось. Для большинства растений не было выявлено чёткой связи между пигментами и концентрацией металлов в растениях. Следует отметить высокую корреляцию между содержанием суммы водорастворимых форм металлов в листьях берёзы и содержанием в них металлотioneинов и глутатиона.

Заключение

Результаты исследований показали определённую положительную связь значений ФА

листовой пластины с содержанием металлов в почвах и листьях берёзы. Так, коэффициент корреляции для пары ФА – сумма металлов в листьях оказался равным +0,70, а для пары ФА – сумма металлов в почвах +0,60. Значение ФА коррелировало также с уровнем содержания МТ в листьях ($r = +0,80$). При этом связь суммы металлов и концентраций МТ в листьях была высокой ($r = +0,88$). Это свидетельствует о том, что в листьях берёзы, произрастающей в пределах Унальского хвостохранилища, в ответ на избыток металлов усиливается синтез блокирующих металлы веществ – МТ и других серосодержащих фитохелатинов.

Значения ФА сильно колеблются. Это отражается на средних данных этого параметра и ошибки среднего арифметического. В результате высокого варьирования ФА отдельных листьев берёзы на разных площадках оценка статистических различий между ними оказалась затруднительной, несмотря на то, что степень отклонений от среднего значения также является параметром изменчивости морфологического признака. В целом, ФА листьев деревьев можно использовать как дополнительный экологический маркер среди других параметров оценки объектов накопленного экологического вреда.

References

1. Bolshakov V.N., Moiseenko T.I. Anthropogenous evolution of animals: facts and their interpretation // *Ekologiya*. 2009. No. 5. P. 323–332 (in Russian). doi: 10.1134/S1067413609050014
2. Olkova A.S. Modern trends in the development of the methodology of bioassay aquatic environments // *Theoretical and Applied Ecology*. 2018. No. 3. P. 19–26. doi: 10.25750/1995-4301-2018-3-019-026
3. Bezel' V.S. Ecological toxicology: population and biocenotic aspects. Ekaterinburg: Goshchitskiy, 2006. 280 p. (in Russian).
4. Vorobeychik E.L. Ecological rationing: on the way to the generalizing theory // *Ecological rationing and quality management of soils and lands*. Moskva: NIA-Priroda, 2013. P. 29–38 (in Russian).
5. Lutskan E.N., Shadrina E.G. Bioindicator assessment of state of environment of the city of Aldan on the basis of the analysis of the fluctuating asymmetry of Asian white birch // *Mezhdunar. Zhurn. Prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy*. 2013. No. 8–2. P. 139–142 (in Russian).
6. Graham J.H., Whitesell M., Fleming M., Or H.H., Nevo T., Raz S. Fluctuating asymmetry of plant leaves: batch processing with LAMINA and continuous symmetry measures // *Symmetry*. 2015. V. 7. No. 1. P. 255–268. doi: 10.3390/sym7010255

7. Coda J.A., Martiner J.J., Steinmann A.R., Comez V.D. Fluctuating asymmetry as an indicator of environmental stress in small mammals // *Mastozoologia Neotropical*. 2017. V. 24. No. 2. P. 313–321.
8. Kozlov M.V. As it is not necessary to study the fluctuating asymmetry // *Sibirskiy lesnoy zhurnal*. 2018. No. 4. P. 81–84 (in Russian).
9. Palmer A.R., Strobeck C. Fluctuating asymmetry analyses revisited // *Developmental instability: causes and consequences* / Ed. M. Polak. Oxford: Oxford Univ. Press., 2003. P. 279–319.
10. Sandner T.M., Matthies D. Fluctuating asymmetry of leaves is a poor indicator of environmental stress and genetic stress by inbreeding in *Silene vulgaris* // *Ecol. Indicators*. 2017. V. 79. P. 247–253.
11. Telhado C., Silveria F.A., Fernandes G.W., Cornelissen T. Fluctuating asymmetry in leaves and flowers of sympatric species in a tropical montane environment // *Plant Species Biology*. 2017. V. 32. No. 1. P. 3–12. doi: 10.1111/1442-1984.12122
12. Téllez T.R., Møller A.P. Fluctuating asymmetry of leaves in *digitalis thapsi* under field and common garden conditions // *International Journal of Plant Sciences*. 2006. V. 167. No. 2. doi: 10.1086/499613
13. Valkama J., Kozlov M. V. Impact of climatic factors on the developmental stability of mountain birch growing in a contaminated area // *J. Appl. Ecol.* 2001. V. 38. No. 3. P. 665–673.
14. Mendes G., Boaventura M.G., Cornelissen T. Fluctuating asymmetry as a bioindicator of environmental stress caused by pollution in a pioneer plant species // *Environ Entomol.* 2018. V. 47. No. 6. P. 1479–1484. doi: 10.1093/ee/nvy147
15. Opekunova M.G., Basharin R.A. Use of the fluctuating asymmetry of leaves of birch (*Betula pubescens* Ehrh.) for assessment of environmental pollution near Kostomuksha // *Vestnik SPGU*. 2014. Ser. 7. V. 3. P. 58–70 (in Russian).
16. Yermakov V.V., Tyutikov S.F., Gulyaeva U.A., Degtyaryov A.P., Danilova V.N. Biomonitoring of ecological condition of mining and processing works and adjacent territories // Certificate of state register database. No. 2020620044. Application: 14.01.2020. Date of publication: 14.01.2020 (in Russian).
17. Zakharov V.M., Baranov A.S., Borisov V.I., Vavletsky A.V., Kryazheva N.G., Chistyakova E.K., Chubishvili A.T. Environmental health: assessment methodology. Moskva: Tsentr ekologicheskoy politiki Rossii, 2000. 65 p. (in Russian).
18. Tyutikov S.F. Calculation of the fluctuating asymmetry for geoenvironmental monitoring // Certificate of state registration of a computer program No. 2020614097. Application: 26.03.2020. Date of publication: 26.03.2020 (in Russian).
19. Tyutikov S.F., Proskuryakova L.V. Biomonitoring of ecological condition of background territories of the Central Russia // Certificate of state register database. No. 2020622532. Application: 07.12.2020. Date of publication: 07.12.2020 (in Russian).
20. Yermakov V.V., Perelomov L.V., Khushvakhtova S.D., Tyutikov S.F., Danilova V.N., Safonov V.A. Biogeochemical assessment of the urban area in Moscow // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2017. V. 189. P. 641–651. doi: 10.1007/s10661-017-6363-y