

Научная статья

УДК 57.087.1

DOI 10.46845/1997-3071-2022-66-19-29

Прогнозирование динамики лесных экосистем в условиях загрязнения промышленными аэровыбросами по состоянию травянистых растений

Ольга Александровна Белых

Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия, boairk@mail.ru, ORCID 0000-0001-7274-1420

Аннотация. Статья посвящена фундаментальной проблеме биохимической экологии – установлению математических закономерностей, описывающих влияние техногенных поллютантов на сосудистые растения. У сотрудников лесного хозяйства, национальных парков и научных организаций лесного комплекса существует потребность подготовки прогнозов динамики лесных экосистем для научной и хозяйственной деятельности, принятия управленческих явлений. Загрязнение природных территорий вблизи промышленных предприятий Иркутской области связано с пылегазовыми выбросами, аккумулируемыми почвами и растениями уникального природного объекта оз. Байкал, находящегося под охраной ЮНЕСКО. Целью исследования является система взаимосвязей многолетних растений рода *Thalictrum*, чувствительных к изменению условий обитания в связи с произрастанием на территории с накопленным экологическим ущербом. В статье дана характеристика мест распространения маркерных растений. Приводятся сведения о содержании условно-токсичных элементов и описано их распределение в почвенных горизонтах промышленно загрязненных территорий Южного Прибайкалья. В работе доказывается возможность применения метода математического моделирования для выявления зависимости габитуса экологического маркера от условий влияния природно-техногенной среды. Представлена математическая модель, связывающая значимые экологические факторы промышленно загрязненных территорий, влияющие на развитие биоиндикаторных видов растений *Thalictrum minus* L. Используя полученный ряд уравнений, автор разработал экономичную методику, позволяющую учитывать минимальное число характеристик вида-биоиндикатора для прогнозирования состояния почвы и биоты в пределах загрязненной территории. Данная модель создана для проведения прогнозной оценки состояния лесных экосистем на примере Южного Прибайкалья рядом специалистов – биологами, экологами, лесниками.

Ключевые слова: экология, биоиндикация, микроэлементный состав, почвы, рентгенофлуоресцентный анализ, системный анализ, математическая модель

Для цитирования: Белых О. А. Прогнозирование динамики лесных экосистем в условиях загрязнения промышленными аэровыбросами по состоянию травянистых растений // Известия КГТУ. 2022. № 66. С. 19–29.

Original article

Forecasting the dynamics of forest ecosystems in conditions of industrial emissions pollution by the state of herbaceous plants

Olga A. Belykh

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, boa@mail.ru,
ORCID 0000-0001-7274-1420

Abstract. The article is devoted to the fundamental problem of biochemical ecology – finding mathematical patterns that describe the effect of technogenic pollutants on vascular plants. In the activities of employees of forestry, national parks and scientific organizations of the forestry complex, there is a need to prepare forecasts of the forest ecosystems dynamics for scientific and economic activities and for the adoption of managerial phenomena. Pollution of natural areas near an industrial enterprises of the Irkutsk region is associated with dust and gas emissions from accumulated soils and plants of the unique natural object of Lake Baikal, which is under the protection of UNESCO. The object of the study is the system of interrelations of perennial plants of the genus *Thalictrum* sensitive to changes in habitat conditions due to growth in areas with accumulated environmental damage. The article describes the habitat conditions of marker plants. Information is given on the content of conditionally toxic elements in the soil horizons of industrially polluted territories of the Southern Baikal region. Distribution of these elements in soil horizons is described. The paper proves the possibility of using the method of mathematical modeling to identify the dependence of the habitus of an ecological marker on the conditions of influence of the natural and technogenic environment. A mathematical model is presented that relates significant environmental factors of industrially contaminated territories that affect the development of bioindicator plant species *Thalictrum minus* L. territory. This model was developed to carry out a predictive assessment of the state of forest ecosystems on the example of the Southern Baikal region by biologists, ecologists, and foresters.

Keywords: ecology, bioindication, trace element composition, soils, X-ray fluorescence analysis, system analysis, mathematical model

For citation: Belykh O. A. Forecasting the dynamics of forest ecosystems in conditions of industrial emissions pollution by the state of herbaceous plants. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2022;(66):19–29.(in Russ.).

ВВЕДЕНИЕ

Информация о состоянии лесных экосистем в условиях техногенного загрязнения востребована для повышения эффективности мероприятий по охране биоты природных территорий, составлению экологического прогноза земель с накопленным ущербом и управлению действиями по социально-экономическому развитию регионов. Существует потребность подготовки прогнозов динамики уязвимых природных сообществ национальных парков и других особо охраняемых территорий для научной и хозяйственной деятельности. Для этого необходимо знание большого числа данных о признаках фитоценозов и математические средства. Таковой является задача многофакторного прогнозирования показате-

лей, характеризующих параметры развития экологически чувствительных травянистых многолетников, произрастающих в условиях загрязнения поллютантами [1].

Антропогенной трансформации растительного покрова посвящен целый ряд работ в отечественной и зарубежной литературе [2-5]. Актуальным является научно-прикладное использование биологических объектов в качестве индикаторов контроля состояния природной среды. Публикуется опыт применения низших и сосудистых растений для изучения поллютации промышленных территорий [6-8]. Практики утверждают, что сложно установить экспертную зависимость между повреждаемостью лесных экосистем и техногенным загрязнением, в связи с чем необходимо разрабатывать методики использования видов, чувствительных к аэропромышленным выбросам и накоплению повреждающих элементов в почве. Наиболее известными биоиндикационными методами являются оценки, выполненные для хвойных деревьев. Растения чувствительны ко многим промышленным загрязнителям, в связи с чем можно обоснованно связывать жизненное состояние особей с уровнем и характером загрязнения почвы, воды и воздуха и на этом основании использовать определенные виды в качестве биоиндикаторов оценки окружающей среды. Аэротехногенные выбросы оказывают влияние на особенности протекания физиологических реакций у растений, которые отражаются в их морфологическом строении, определяющем оценку степени загрязнения экосистемы: снижении габитуса (низкий уровень), уменьшении размеров вегетативных и генеративных органов (средний уровень), утрате генеративной функции (высокий уровень) [9].

Цель исследования заключается в разработке многофакторных механизмов оценки влияния экологических условий на биоиндикаторные виды с целью их использования для экологического прогноза динамики растительности природных территорий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве биоиндикатора в эксперименте был отобран василисник малый (*Thalictrum minus* L.) из семейства *Ranunculaceae* Juss, вид достаточно чувствительный к экологическому загрязнению. Лютиковые, являясь травянистыми поликарпиками мезофитной природы, часто служат создателями травяного покрова, в Южной Сибири распространены в мелколиственных, светлехвойных и смешанных лесах. Под пологом леса, на опушках и лесных редианах мезофитные виды встречаются с обилием *sp*, реже *cop1*, проективное покрытие вида, измеряемое сеточкой Раменского, составляет от 1 до 15 %. Корневище с мочкой придаточных корней располагается в верхних горизонтах почвы A_0-A_1 до 15–20 см [10].

В качестве территорий с накопленной экологической нагрузкой были взяты окрестности вблизи г. Шелехова и Байкальска Иркутской области, в районе южного побережья оз. Байкал – объекта Всемирного наследия ЮНЕСКО. Основными градообразующими предприятиями и главными источниками эмиссий загрязняющих веществ в атмосферу являлись ОАО "Иркутский алюминиевый завод" и (до остановки производства в сентябре 2013 г.) ОАО "Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат". Пылегазовые выбросы последних распространялись вдоль побережья Байкала до 160 км к северо-востоку, попадая на территорию Байкальского заповедника, и до 40–50 км и более к западу, достигая г. Слюдянка и пос. Култук. Поднимаясь до

1500–1800 м вверх, эти выбросы распространялись по склонам хребта Хамар-Дабан и в долинах рек до верхней границы леса, а также по акватории Байкала, охватывая площадь более 2 тыс. км² [11]. Полевые исследования проводили на стационарах и маршрутным методом.

Аналитические исследования почвенных проб проведены в аккредитованной¹ лаборатории Института геохимии им А. П. Виноградова СО РАН. Определение элементного состава образцов выполняли методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) на волновом спектрофотометре "S4 Pioneer (Bruker, AXS)" [12] с рентгенооптической схемой по Соллеру, оснащенном рентгеновской трубкой с Rh-анодом мощностью 4 кВт. Для построения градуировочной характеристики и оценки правильности определения использовали государственные стандартные образцы почв, речных и донных осадков, илов и рыхлых отложений².

Массивы многолетних данных анализировались одно- и многомерными статистическими методами [13,14] с помощью пакета компьютерных программ "Statistica 8". Для построения моделей использован регрессионный анализ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экологический прогноз будущего изменения состояния экосистемы в условиях промышленного загрязнения строится с применением математических моделей, описывающих влияние экологических факторов на формирование показателей системы или биоиндикаторов. При экологической оценке загрязнений природной территории использование биологических объектов часто дает более ценную информацию, чем прямая оценка загрязнения приборами, так как растения интегрально реагируют на весь комплекс поллютантов. Обладая генетической памятью в ряду поколений, многолетники своими реакциями отражают изменения за длительный период. В отечественной и зарубежной литературе имеется много сведений о том, что на параметры развития особей значительное влияние оказывают экологические факторы в зависимости от характеристик местообитания, фитоценотического окружения и степени антропогенного изменения характеристик территории [15]. Поэтому к исследованию данного процесса важно подходить с позиций системного анализа.

При оценке качества природной территории особое внимание уделяется содержанию токсичных элементов, представляющих наибольшую опасность для биоты. В литературе достаточно указаний на то, что уровень содержания тяжелых металлов в растениях зависит от наличия токсических веществ в почве [12]. Металлы при избыточном попадании в объекты окружающей среды ведут себя как токсиканты и экотоксиканты. Аэропромышленные выбросы оседают на растениях, попадают вместе с листовым отпадом и смываются осадками в почву, где успевают частично разбавиться водой до менее опасных концентраций, но при этом нарушить естественное функционирование лесного биоценоза. Таким образом, максимальное содержание токсичных элементов наблюдается в верхних слоях почвы, где растения посредством корневой системы получают воду и растворенные минеральные вещества, используемые для процессов фотосинтеза. Всего

¹ Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001. 513593.

² Арнаутов Н. В. Стандартные образцы химического состава природных минеральных веществ: методические рекомендации. – Новосибирск: ИГиГ СО РАН АН СССР, 1087. – 204 с.

было определено методом рентгенофлуоресцентного анализа содержание 10 условно токсичных элементов, которое представлено в табл. 1.

Таблица 1. Содержание условно-токсичных элементов в почвенных горизонтах промышленно загрязненных территорий Южного Прибайкалья

Table 1. Content of conditionally toxic elements in the soil horizons of industrially polluted territories of the Southern Baikal region

№ п/п	Координаты географического пункта	Горизонт	TiO ₂ (%)	Co (%)	Ni (%)	Cu (%)	Zn (%)	Rb (%)	Sr (%)	Zr (%)	Pb (%)	Ba (%)
1	N 52° 12.6125 E 104° 5.8437	A ₀	4,220	0,0013	0,0044	0,0060	0,0063	0,0034	0,0159	0,0188	0,0024	0,0319
		A ₁	4,211	0,0013	0,0044	0,0060	0,0063	0,0034	0,0159	0,0188	0,0024	0,0299
2	N 52°16.1813 E 104°11.3951	A ₀	4,263	0,0012	0,0041	0,0019	0,0056	0,0032	0,0192	0,0179	0,0023	0,0579
		A ₁	4,352	0,0011	0,0043	0,0018	0,0057	0,0033	0,0196	0,0187	0,0018	0,0596
3	N 51° 39.38 0 E 103° 43.1215	A ₀	5,312	0,0010	0,0049	0,0047	0,0096	0,0069	0,0210	0,0278	0,0022	0,0536
		A ₁	5,934	0,0010	0,0047	0,0050	0,0100	0,0050	0,0214	0,0285	0,0023	0,0519
4	N 51°54.4391 E 104.0566	A ₀	7,243	0,0023	0,0115	0,0072	0,0068	0,0039	0,0315	0,0189	0,0022	0,0537
		A ₁	7,365	0,0027	0,0113	0,0072	0,0077	0,0037	0,0326	0,0179	0,0018	0,0510
5	N 51° 47.023 E 104° 0.0470	A ₀	6,885	0,0024	0,0103	0,0047	0,0056	0,0041	0,0214	0,0293	0,0018	0,0668
		A ₁	7,234	0,0028	0,0105	0,0049	0,0057	0,0040	0,0219	0,0372	0,0021	0,0585
6	N 51° 49.094 E 104° 0.0465	A ₀	5,130	0,0021	0,0051	0,0037	0,0068	0,0032	0,0194	0,0186	0,0020	0,0349
		A ₁	6,738	0,0020	0,0061	0,0034	0,0077	0,0037	0,0196	0,0194	0,0017	0,0332
7	N 51°50.378 E 104°1.3737	A ₀	6,410	0,0018	0,0053	0,0039	0,0064	0,0053	0,0182	0,0243	0,0595	0,0593
		A ₁	6,312	0,0019	0,0051	0,0054	0,0067	0,0052	0,0173	0,0363	0,0585	0,0596
8	N 51°59.992, E 103°9'1892	A ₀	6,934	0,0020	0,0057	0,0041	0,0071	0,0059	0,0264	0,0323	0,0650	0,0519
		A ₁	6,934	0,0020	0,0057	0,0041	0,0071	0,0059	0,0264	0,0323	0,0649	0,0510

Распределение данных элементов в почвенных горизонтах A₀–A₁ представлено следующим убывающим рядом: TiO₂ > Ba > Zr > Sr > Zn > Cu > Ni > Rb > Pb > Co. Группа элементов Rb, Cu, Pb характеризуется средней степенью доступности поглощения; Zn, Ba, Ti, Ni – трудно доступны растениям. Для определения влияния условно токсичных элементов на рост и развитие растений использовали их валовое содержание.

Система, характеризующая развитие растений, является сложной, так как содержит множество компонентов, находящихся в различных генотипических связях, и зависит от совокупности факторов, которые надо проанализировать с точки зрения их статистической значимости. Морфологические характеристики растений ряд авторов – А. А. Уранов, Н. В. Дылис – рассматривают как совокупный показатель состояния растения в фитоценозе и объединяют понятием "жизненность". При более детальных обследованиях определяют жизненность взвешиванием сухой массы всех особей данного вида с единицы площади отдельного фитоценоза, она служит мерой мощности ценотической популяции и зависит от числа особей на единицу площади. При оптимальной площади занимаемой популяцией все особи проходят регенеративные и генеративные фазы развития, обеспечивая процветание вида в фитоценозе. А. А. Уранов предложил оценивать жизненность популяции в баллах на основе учета проективного покрытия вида (в %). Эта шкала была дополнена показателями, характеризующими габитус отдельных растений в микрогруппировках или парцеллах растения-биоиндикатора. Здесь для анализа экологических факторов, влияющих на развитие анализируемых индикаторных признаков *Thalictrum minus* L., были рассмотрены:

- y₁ – высота стебля (см),
- y₂ – протяженность сложного листа (см),
- y₃ – ширина сложного листа (см),

y_4 – средний размер междоузлий (см),

y_5 – высота соцветия (см).

Использование математического моделирования позволит повысить эффективность оценки состояния территории с помощью травянистых многолетников и обеспечить достоверность продукционного прогноза.

Выбор факторов при построении модели множественной регрессии обычно происходит на основе качественного теоретико-экологического и статистического анализа тенденций изменения рассматриваемых процессов. В настоящей работе для прогнозирования экологического воздействия на биоту были рассмотрены модели множественной линейной регрессии и нелинейные степенные регрессионные.

На первом этапе анализа влияния экологической обстановки изучались следующие факторы местообитаний исследуемых ценопопуляций:

x_1 – высота местности над уровнем моря (м),

x_2 – площадь проективного покрытия вида (%),

x_3 – сомкнутость крон деревьев (%),

x_4 – валовое содержание почвенных поллютантов (%).

В работе были использованы характеристики реперных участков промышленно загрязненных территорий юга Иркутской области, смешанных и темнохвойных лесов Южного Прибайкалья, табл. 2.

Таблица 2. Фитоценотическая характеристика реперных участков промышленно загрязненных территорий юга Иркутской области

Table 2. Phytocenotic characteristics of reference sites of industrially polluted territories of the south of the Irkutsk region

№ п/п	Координаты географического пункта	Рельеф	Растительное сообщество	Состав древесно-стоя	Сомкнутость крон	Вид природопользования
1	N 52° 12.6125, E 104° 5.8437	Ровный	Сосняк травянисто-кустарниковый	5С 2Б+Е 2Ос	0,4	Селитебная зона г. Шелехова
2	N 52° 16.1813, E 104° 11.3951	Первая терраса р. Б. Олха	Смешанный лес разнотравно-осоковый	4Б 4С+Е 2Ос	0,5	Олхинское плато пос. Олха
3	N 51° 39.38 E 103° 43.1215	Ровный	Кедрово-елово-пихтовый лес	7К 2Е П + Б К	0,8	Слюдянское лесничество
4	N 51° 54.4391, E 104.0566	Ровный	Пихтарник редкостойный	4П 3Е 3Б+Ол	0,6	Парковая зона г. Байкальска
5	N 51° 47.023, E 104° 0.0470	Склон 45° северной экспозиции	Кедрово-еловый лес разнотравный	6К 4Е+С 6Б	0,4	Эродированный склон лыжной трассы Соболиной
6	N 51° 49.094, E 104° 0.0465	Слабо-бугристый	Парковый лес папоротниково-разнотравный	8Б 2П 1К+Е	0,4	Селитебная зона г. Байкальска
7	N 51° 50.378, E 104° 1.3737	Слабо-западинный	Техногенное редколесье	5Б 3Ос 2С+К	0,3	Шлакоотстойник
8	N 51° 59.992, E 103° 91892	Ровный	Техногенное редколесье	9Б 1К + П	0,3	Территория БЦБК

В настоящей работе проведен корреляционный анализ рассматриваемых показателей: высоты местности, площади проекции вида, сомкнутости крон древостоя и валового содержания поллютантов в почве (табл. 3). Нами определено, что между площадью проекции вида и валовым содержанием загрязнений выявляется сильная обратная зависимость. Для дальнейшего исследования необходимо исключить одну из переменных во избежание эффекта мультиколлинеарности. Очевидно, что, исключив площадь проекции вида (x_2), мы все равно отслеживаем влияние этой переменной на морфологические свойства растения: чем больше почва накапливает тяжелых металлов, тем меньше относительная площадь проекции вида.

Таблица 3. Корреляционный анализ рассматриваемых факторов
Table 3. Correlation analysis of the factors under consideration

	X_1	X_2	X_3	X_4
X_1	1			
X_2	-0,1642	1		
X_3	0,3425	-0,3231	1	
X_4	0,1135	-0,9537	0,4253	1

Следующим шагом были оценены показатели статистической зависимости и значимости между каждым из исследуемых индикационных признаков биоиндикатора (y_i) и указанным составом регрессионных факторов местообитаний изучаемых ценопопуляций (x_i). Полученные линейные модели с соответствующими МНК-оценками рассматриваемых регрессоров, учитывающие итоги корреляционного анализа, представлены в табл. 4.

Таблица 4. Линейные модели зависимости габитуса растений от экологических условий местообитания ценопопуляций

Table 4. Linear models of plant habitus dependence on environmental factors of habitat

Параметры взаимосвязи (y_i)	Уравнение регрессии	Качество модели (R^2)	P -значимость модели
Высота стебля, см	$y_1 = 259,93 - 0,03x_1 + 67,46 x_3 - 13,01 x_4$	0,94	0,07
Протяженность сложного листа, см	$y_2 = 57,72 - 0,006x_1 + 5,45 x_3 - 2,84 x_4$	0,87	0,15
Ширина сложного листа, см	$y_3 = 77,55 - 0,002 x_1 - 0,36 x_3 - 4,007 x_4$	0,98	0,006
Средний размер междоузлий, см	$y_4 = 44,95 - 0,01 x_1 + 16,79 x_3 - 2,54 x_4$	0,95	0,06
Высота соцветия, см	$y_5 = 109,97 - 0,02 x_1 + 8,03 x_3 - 6,34 x_4$	0,85	0,21

Из табл. 4 видно, что все построенные модели имеют высокий коэффициент детерминации R^2 , т. е. качество моделей достаточно надежное, от 85 до 98 %, что свидетельствует об эффективной подстановке данных для всех групп василисников и валидности полученных моделей для прогнозирования изменения габитуса растений в зависимости от влияния поллютантов на густоту травостоя, сомкнутость крон, изменение элементного состава почвы. Малые значения p -значимости гарантируют верифицированность моделей и возможность прогноза

по ним. Так, если содержание условно токсичных элементов в почве (x_4) увеличится на 1 % от своего среднего уровня, то габитус *Thalictrum minus* L. изменится следующим образом: высота стебля (y_1) снизится на 13,01 %; длина сложного листа (y_2) понизится на 2,84 %; ширина сложного листа (y_3) станет меньше на 4,007 %; средний размер междоузлий (y_4) уменьшится на 2,54 %; размер соцветия (y_5) сократится на 6,34 % от своего среднего значения при неизменных других факторах. Эти данные говорят о том, что станут меньше не только размеры органов *Thalictrum minus* L., но и сократится его семенная продуктивность, благодаря которой вегетативно неподвижные виды удерживают место в фитоценозе. Таким образом, данная модель позволяет прогнозировать изменение габитуса растений в условиях изменения освещения при изреживании древостоя под влиянием аэро-техногенного загрязнения.

Подытожим – для прогнозирования динамики состояния лесных фитоценозов в условиях прессинга промышленных аэровыбросов выполнено многофакторное прогнозирование с применением характеристик травянистых мезофитов в градиенте эколого-фитоценологических условий. Создана многофакторная модель оценки экологического состояния лесных экосистем в условиях техногенного загрязнения исходя из решаемой задачи, выбранных моделей и сведений экспертов, которая позволяет прогнозировать изменения содержания элементного состава почвы (условно токсичных элементов) и особенности развития биоты. Для этого достаточно проводить ежегодные маршрутные наблюдения в момент максимального развития растений, что соответствует фенологической фазе – полному цветению или началу плодоношения, а также фиксировать параметры развития вида-биоиндикатора, условия освещенности под пологом леса и густоту покрытия травостоя. Метод эффективен, не требует специального оборудования и реактивов, наличия ПК и программных средств, доступен для подготовленного пользователя (экологов, биологов, лесников).

Установленные закономерности изменения габитуса биоиндикаторного вида *Thalictrum minus* L. убедительно доказывают влияние условно накопленных токсичных элементов в верхнем гумусовом горизонте почвы. Предложенный метод экономичен, точен, не требует дорогостоящего оборудования. Полагаем, что методология математического моделирования станет прикладным инструментом для специалистов-биологов, экологов, лесного дела и туристического бизнеса в оценке и прогнозировании состояния лесных экосистем южной части оз. Байкал, являющегося объектом всемирного наследия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проведенные в промышленно загрязненных районах Южного Прибайкалья, позволили установить, что индикационная реакция травянистых растений на поллютанты проявляется в понижении их жизненности и уменьшении показателей развития продуктивных признаков (высоты растения, размеров листа, развития генеративных органов, формирующих все элементы семенной продуктивности, отвечающие за присутствие вида в фитоценозе) у биоиндикаторных видов. Если наблюдается необратимое изменение ценопопуляции под действием промышленной поллютации, в итоге это может привести к ее старению и деградации. Такой тип динамики является сукцессивным. Описанные закономер-

ности могут выступать валидным критерием для экологической оценки и составления прогноза динамики биоты природных территорий. Изучение изменения состояния травянистых многолетников в условиях техногенного пресса промышленных территорий может служить аппроксимацией влияния экологических условий района на состояние лесных экосистем.

Список источников

1. Системный анализ и синтез стратегических решений в инноватике. Математические, эвристические и интеллектуальные методы системного анализа и синтеза инноваций: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Прикладная математика и физика" или по направлениям и специальностям в области естественных наук, техники и технологии, системного анализа и управления / А. В. Андрейчиков [и др.]. Изд. 2-е. Москва: ЛИБРОКОМ, 2012. 304 с.
2. Изучение морфологических признаков и флуктуирующей способности листового аппарата березы повислой // С. А. Кабанова [и др.] // Природообустройство. 2021. № 4. С. 116–122.
3. Phytotoxic effects of Cu, Cd and Zn on the seagrass *Thalassia hemprichii* and metal accumulation in plants growing in Xincun Bay, Hainan, China / Jin Zheng Xiao-Qian, Gu Tai-Jie, Zhang Hui-Hui, Liu Qiao-Jing, Ou Chang-Lian Peng // Ecotoxicology. 2018. Vol. 27. Issue 5. P. 517–526.
4. Air pollution assessment in the area of aluminum production by snow geochemical survey / L. M. Filimonova, V. A. Bychinskiy, A. V. Parshin // Russian Meteorology and Hydrology. 2015. Vol. 40. No. 10, P. 691–698.
5. Калугина О. В., Михайлова Т. А., Шергина О. В. Использование травянистых растений (*Chamaeneron fngustifolium* и *Tanacetum vulgare*) для мониторинга загрязнения территории фторсодержащими выбросами // Химия растительного сырья. 2019. № 1. С. 309–316.
6. Ахмерова Д. Н., Шахринова Н. В. Биоиндикация загрязнения атмосферного воздуха по состоянию хвои сосны обыкновенной на территории города Бирск // Глобальный научный потенциал. 2018. № 6 (87). С. 69–71.
7. Дейнега Е. А., Савватеева О. А. Экспресс-контроль антропогенной трансформации городских экосистем методами биоиндикации хвойных пород // Фундаментальные исследования. 2012. № 5. С. 407–411.
8. Калугина О. В., Михайлова Т. А., Шергина О. В. Биохимическая адаптация сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) к техногенному загрязнению // Сибирский экологический журнал. 2018. Т. 25. № 1. С. 98–110.
9. Заугольнова Л. Б., Ханина Л. Г. Параметры мониторинга биоразнообразия лесов России на федеральном и региональном уровнях // Лесоведение. 2004. № 3. С. 3–14.
10. Конспект флоры Сибири. Сосудистые растения / под ред. К. С. Байкова. Новосибирск: Наука, 2005. 355 с.
11. Белых О. А., Чупарина Е. В., Мокрый А. В. Элементный состав хвои семейства сосновые (*Pinaceae*) на территории с накопленным экологическим ущербом, Южное Прибайкалье // Экологическая химия. 2020. Т. 29. № 4. С. 185–189.

12. Чупарина Е. В., Мартынов А. М. Применение неdestructивного РФА для определения элементного состава лекарственных растений // Журнал аналитической химии. 2011. Т. 66, № 4. С. 399–405.
13. Рогачева О. А. Статистика: учебное пособие. Иркутск: Изд-во БГУ, 2017. 148 с.
14. Паршин А. В., Руш Е. А., Спиридонов А. М. Автоматизация процесса экологического мониторинга озера Байкал с применением современных ГИС и WEB-технологий // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 1 (29). С. 82–87.
15. Жмудь Е. В., Дорогина О. В., Ачимова А. А. Пластичность морфоструктуры побегов *Hedysarum hedysaroides* (Fabaceae) в различных эколого-географических условиях // Сибирский экологический журнал. 2018. Т. 25. № 2. С. 183–193.

References

1. Andreychikov A. V. [i dr.]. *Sistemnyy analiz i sintez strategicheskikh resheniy v innovatike. Matematicheskie, evristicheskie i intellektual'nye metody sistemnogo analiza i sinteza innovatsiy: uchebnoe posobie dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy, obuchayushchikhsya po napravleniyu "Prikladnye matematika i fizika" ili po napravleniyam i spetsial'nostyam v oblasti estestvennykh nauk, tekhniki i tekhnologii, sistemnogo analiza i upravleniya* [System analysis and synthesis of strategic decisions in innovation. Mathematical, heuristic and intellectual methods of system analysis and synthesis of innovations]. Izd. 2-e. Moscow, LIBROKOM Publ., 2012, 304 p.
2. Kabanova S. A. [i dr.]. *Izuchenie morfologicheskikh priznakov i fluktuiruyushchey sposobnosti listovogo apparata berezy povisloy* [Study of morphological features and fluctuating ability of the leaf apparatus of the silver birch]. *Prirodobustroystvo*, 2021, no. 4, pp. 116–122.
3. Phytotoxic effects of Cu, Cd and Zn on the seagrass *Thalassia hemprichii* and metal accumulation in plants growing in Xincun Bay, Hainan, China. Jin Zheng Xiao-Qian, Gu Tai-Jie, Zhang Hui-Hui, Liu Qiao-Jing, Ou Chang-Lian Peng. *Ecotoxicology*, 2018, vol. 27, no. 5. pp. 517–526.
4. Filimonova L. M., Bychinskiy V. A., Parshin A. V. Air pollution assessment in the area of aluminum production by snow geo-chemical survey. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2015, vol. 40, no. 10, pp. 691–698.
5. Kalugina O. V., Mikhaylova T. A., Shergina O. V. *Ispol'zovanie travyanistyykh rasteniy (Chamaeneron angustifolium i Tanacetum vulgare) dlya monitoringa zagryazneniya territorii ftorsoderzhashchimi vybrosami* [The use of herbaceous plants (*Chamaenerion angustifolium* and *Tanacetum vulgare*) for monitoring the pollution of the territory with fluorinated emissions]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2019, no.1, pp 309–316.
6. Akhmerova D. N., Shakhriyeva N. V. Bioindikatsiya zagryazneniya atmosfery po sostoyaniyu khvoi sosny obyknovennoy na territorii goroda Birska [Bioindication of atmospheric air pollution by the state of pine needles in the territory of the city of Birska]. *Global'nyy nauchnyy potentsial*, 2018, no. 6 (87), pp. 69–71.
7. Deynaga E. A., Savvateeva O. A. *Ekspress-kontrol' antropogennoy transformatsii gorodskikh ekosistem metodami bioindikatsii khvoynykh porod* [Express control

of anthropogenic transformation of urban ecosystems by methods of bioindication of conifers]. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2012, no. 5, pp. 407–411.

8. Kalugina O. V., Mikhaylova T. A., Shergina O. V. Biokhimicheskaya adaptatsiya sosny obyknovennoy (*Pinus sylvestris*) k tekhnogennomu zagryazneniyu [Biochemical adaptation of Scots pine (*Pinus sylvestris*) to man-made pollution]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal*, 2018, vol. 25, no. 1, pp. 98–110.

9. Zaugol'nova L. B., Khanina L. G. Parametry monitoringa bioraznoobraziya lesov Rossii na federal'nom i regional'nom urovnyakh [Parameters of monitoring biodiversity of Russian forests at the federal and regional levels]. *Lesovedenie*, 2004, no. 3, pp. 3–14.

10. *Konspekt flory Sibiri. Sosudistye rasteniya* [Synopsis of the flora of Siberia. Vascular plants], pod red. Baykova K. S. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005, 355 p.

11. Belykh O. A., Chuparina E. V., Mokryy A. V. Elementnyy sostav khvoi semeystva sosnovye (Pinaceae) na territorii s nakoplenym ekologicheskim ushcherbom, Yuzhnoe Pribaykal'e [The elemental composition of pine needles (Pinaceae) in the territory with accumulated environmental damage, Southern Baikal region]. *Ekologicheskaya khimiya*, 2020, vol. 29, no. 4, pp. 85–189.

12. Chuparina E. V., Martynov A. M. Primenenie nedestruktivnogo RFA dlya opredeleniya elementnogo sostava lekarstvennykh rasteniy [The use of non-destructive RF for determining the elemental composition of medicinal plants]. *Zhurnal analiticheskoy khimii*, 2011, vol. 66, no. 4, pp. 399–405.

13. Rogacheva O. A. *Statistika: uchebnoe posobie* [Statistics: study guide]. Irkutsk, Baikal State University Publ., 2017, p. 148.

14. Parshin A. V., Rush E. A., Spiridonov A. M. Avtomatizatsiya protsessa ekologicheskogo monitoringa ozera Baykal s primeneniem sovremennykh GIS i WEB-tekhnologiy [Automation of the process of ecological monitoring of Lake Baikal using modern GIS and WEB technologies]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie*, 2011, no. 1 (29), pp. 82–87.

15. Zhmud' E. V., Dorogina O. V., Achimova A. A. Plastichnost' morfostruktury pobegov *Hedysarum hedysaroides* (Fabaceae) v razlichnykh ekologogeo-graficheskikh usloviyakh [Plasticity of morphostructure of *Hedysarum hedysaroides* B.Fedtsch. ((Fabaceae) shoots in various ecological and geographical conditions)]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal* [Contemporary Problems of Ecology], 2018, vol. 25, no. 2, pp. 83–193.

Информация об авторе

О. А. Белых – доктор биологических наук, доцент

Information about the author

O. A. Belykh – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor

Статья поступила в редакцию 15.07.2022; одобрена после рецензирования 18.07.2022; принята к публикации 19.07.2022

The article was submitted 15.07.2022; approved after reviewing 18.07.2022; accepted for publication 19.07.2022