

УДК 504.06, 631.4

DOI:10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-1-25-35

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОЧВ И РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА В ОКРЕСТНОСТЯХ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО КОМБИНАТА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

М. В. Евдокимова*, А. С. Яковлев

МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12

* E-mail: soil.resources@mail.ru

Проанализированы закономерности пространственной и временной изменчивости нормализованного относительного вегетационного индекса в окрестностях источника поступления в окружающую среду тяжелых металлов в зависимости от их концентрации в почвах. Анализом особых точек теоретического уравнения зависимости концентрации фотосинтетически активной биомассы от результирующей концентрации поллютантов в почве выявлена предельно допустимая концентрация тяжелых металлов в почве. Результаты ее определения в условиях, характерных для северной лесостепи при текущем уровне антропогенной нагрузки, по материалам MODIS составили 12,3, по Sentinel-2–12,5 мг/кг соответственно. Предложен способ обобщения макрокинетических закономерностей отклика живого на антропогенное воздействие. Результаты оценки экологических рисков показали, что вероятность превышения пороговой концентрации, установленной при обобщении макрокинетических закономерностей отклика на воздействие, составляет 74%. На основе принятой в природоохранной практике пятиуровневой шкалы качества почвы и показателя ее состояния провели ранжирование качества почв и растительного покрова в окрестностях горно-обогатительного комбината (ГОКа). Ареалы одинаковой устойчивости почв и растительного покрова к действию загрязняющих веществ в зоне воздействия ГОКа нанесены на топографическую основу. В окрестностях ГОКа преобладают территории, относящиеся к I и II категориям качества почв, то есть характеризующиеся фоновым и переходным состоянием. Выделена природно-защитная зона предприятия и определены фоновые территории.

Ключевые слова: MODIS, Sentinel-2, NDVI, экологический мониторинг, экологическое нормирование, ПДК, сезонная динамика фотосинтетически активной биомассы.

Введение

Критериями безопасности и безвредности компонентов атмосферного воздуха для человека являются санитарно-гигиенические показатели — предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ и предельно допустимые уровни (ПДУ) вредных физических воздействий на атмосферу [Федеральный закон № 52, 1999; Федеральный закон № 96, 1999].

Источниками воздействия на здоровье человека и среду его обитания являются объекты, для которых уровни создаваемого ими загрязнения атмосферного воздуха за пределами промышленной площадки превышают 0,1 ПДК или ПДУ [Постановление Главного государственного санитарного врача РФ № 74, 2007]. Критерием для определения размера санитарно-защитной зоны (СЗЗ) служит превышение на ее внешней границе и за ее пределами ПДК загрязняющих веществ для атмосферного воздуха населенных мест и ПДУ физического воздействия [Постановление Главного государственного санитарного врача РФ № 74, 2007; Федеральный закон № 52, 1999].

Размер санитарно-защитной зоны промышленного предприятия устанавливается в зависимости от его мощности и количества выделяемых в окружающую среду загрязняющих веществ, в частности для горно-обогатительного комбината (ГОКа) как предприятия 1 класса ориентировочный размер СЗЗ составляет 1000 м [Постановление Главного государственного санитарного врача РФ № 74, 2007].

В большинстве случаев за пределами СЗЗ реципиентами химического загрязнения являются экосистемы, для оценки состояния которых санитарно-гигиенические критерии не применимы. Природоохранным законодательством Российской Федерации до настоящего времени не определена процедура установления природно-защитных зон (ПЗЗ), критериями для выделения которых должны стать экологические нормативы [Яковлев, 2022; Яковлев, Евдокимова, 2022].

В отсутствие законодательно установленных нормативов качества окружающей среды экологической оценке предшествует построение и анализ экспериментальных дозовых зависимостей с целью получения пороговых значений, пригодных для нормирования и оценки качества компонентов

окружающей среды. Проблемы, требующие решения при выполнении этой задачи, и предложения по их реализации являются предметом данной работы и обуславливают ее актуальность. Целью работы было выявление и обоснование допустимого уровня антропогенного воздействия на наземные экосистемы в окрестностях горно-обогатительного комбината по материалам дистанционного зондирования Земли (MODIS и Sentinel-2). В задачи исследования входило: 1) выявление макрокинетических закономерностей сезонной динамики нормализованного относительного вегетационного индекса в окрестностях ГОКа, рассчитанного по материалам MODIS и Sentinel-2; 2) выявление макрокинетических закономерностей отклика растительности в форме нормализованного относительного вегетационного индекса, рассчитанного по материалам MODIS и Sentinel-2, на загрязнение почв комплексом поллютантов в окрестностях ГОКа; 3) ранжирование качества почв по закономерностям отклика растительности на загрязнение почв комплексом поллютантов в окрестностях ГОКа; 4) обоснование зоны воздействия ГОКа на наземные экосистемы.

Материалы и методы

Исследуемая территория расположена на выровненном водоразделе с врезанными вершинами балок, покрытом преимущественно миграционно-мицеллярными черноземами на карбонатных лессовидных суглинках и глинисто-иллювиальными

черноземами на бескарбонатных лессовидных суглинках под различными вариантами ковыльных и овсецовых степей, замещающихся в последние десятилетия остепненными лугами [Русаков, 2012].

Почвы прилегающих к ГОКу территорий загрязняются тяжелыми металлами, содержащимися в пыли, поступающей с карьера по воздуху [Бакунович и др., 2016]. Согласно данным Росгидромета концентрация взвешенных веществ в атмосферном воздухе на границе СЗЗ и жилой зоны достигает 0,6 ПДК, а содержание взвешенных частиц размером в диаметре 2,5 мкм и 10 мкм — 0,4 и 0,2 ПДК соответственно [Устойчивое развитие..., 2022]. Ветровой режим Старооскольско-Губкинского промышленного района характеризуется преобладанием западных и восточных ветров. В остальных направлениях годовая повторяемость ветров равномерна, но при этом достаточно существенна [График ветра, 2022].

Земельный фонд в окрестностях ГОКа представлен землями промышленного и сельскохозяйственного использования, а также территориями под жилую застройку и индивидуальное жилищное строительство. На северо-западе и северо-востоке от ГОКа расположены селитебные зоны г. Губкина и г. Старого Оскола, на севере — транспортная инфраструктура, соединяющая города.

С целью определения современного уровня загрязнения почв, обусловленного деятельностью ГОКа, в камеральных условиях подобрали 18 пробных площадок, условно однородных по почвенным

Таблица 1

Местоположение пробных площадок в рельефе и их удаленность от источника воздействия

№ ПП	Долгота, °	Широта, °	Расстояние от центра СЗЗ, км	Высота, м	Крутизна, °	Экспозиция
1	37,63	51,19	6,71	207	2	NW
2	37,63	51,20	5,86	186	4	N
3	37,65	51,16	9,56	203	4	SW
4	37,49	51,22	12,01	237	1	W
5	37,47	51,16	16,10	163	2	SE
6	37,55	51,18	10,16	227	3	NW
7	37,55	51,15	13,14	193	5	E
8	37,64	51,17	9,06	198	5	W
9	37,61	51,16	10,35	188	3	NE
10	37,49	51,23	11,91	175	4	N
11	37,59	51,20	7,10	207	4	N
12	37,57	51,19	8,22	211	3	SE
13	37,65	51,13	13,87	195	3	N
14	37,84	51,14	17,64	160	4	S
15	37,76	51,15	13,29	213	2	N
16	37,72	51,20	6,66	213	2	NE
17	37,72	51,21	6,26	181	2	NW
18	37,71	51,20	6,07	213	2	W

Таблица 2

Содержание тяжелых металлов (мг/кг) в почвах пробных площадок

№ ПП	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Sr	V	Zn	z*
1**	5,3	136,0	0,2	7,0	45,0	15,8	0,4	22,5	11,8	50,5	45,7	39,9	11,7
2**	6,3	144,1	0,2	7,4	46,6	17,1	0,5	23,3	11,0	51,5	48,1	43,7	12,5
3	6,0	142,0	0,1	8,5	53,0	15,4	0,6	24,3	9,7	63,0	56,0	44,3	12,6
4	5,1	142,1	0,2	7,6	46,0	17,4	0,4	23,3	10,5	58,8	47,6	39,8	12,0
5	4,9	98,1	0,1	6,2	44,9	12,0	0,3	18,7	8,9	45,9	44,3	30,6	9,8
6	5,0	135,9	0,1	7,3	46,5	15,3	0,5	22,3	9,8	47,9	49,1	39,3	11,3
7	6,7	136,3	0,2	8,2	48,6	18,0	0,5	26,2	10,2	55,0	51,8	44,7	12,9
8**	5,9	150,1	0,1	8,7	53,4	16,7	0,4	28,3	10,8	60,6	56,8	47,0	12,8
9	5,7	150,9	0,2	8,1	48,4	17,4	0,5	25,2	11,5	52,7	51,7	52,1	13,0
10	5,8	155,2	0,2	8,5	54,1	15,9	0,3	26,7	9,7	101,7	55,3	43,9	13,1
11	5,2	99,2	0,2	6,7	40,3	14,3	0,5	21,7	8,9	46,6	40,4	35,0	10,6
12	6,0	163,4	0,2	9,0	131,7	20,8	1,1	64,8	11,2	56,5	57,3	44,6	16,9
13	4,0	188,0	0,3	8,5	59,3	24,0	0,9	29,7	11,0	92,2	44,7	73,2	15,6
14	6,5	160,9	0,2	9,7	56,4	18,5	0,6	29,2	12,7	50,6	55,7	49,0	14,2
15	5,4	160,6	0,2	9,2	54,8	19,7	0,7	28,3	59,2	54,6	53,1	54,2	16,4
16	5,4	149,9	0,3	10,4	52,1	21,7	0,7	29,1	13,2	52,2	49,6	50,7	14,5
17	5,8	188,6	0,4	9,3	51,4	23,3	0,6	28,3	12,7	65,4	48,9	69,3	15,6
18	7,1	146,1	0,2	9,5	58,4	18,8	0,6	28,0	12,1	58,4	60,7	51,5	14,3
Пыль ***	5,2	360	0,11	11,0	110,0	20,0	0,9	59,0	12,0	110,0	52,0	53,0	11,7
ПДК ****	10,0	–	2,0	4,0	6,0	3,0	–	4,0	32,0	–	150,0	23,0	9,5

Примечание. * — средняя геометрическая концентрация, ** — Государственный природный заповедник «Белогорье», участок «Ямская Степь», *** — пыль из цехов ГОКа [Бакунович и др., 2016], **** — СанПиН 1.2.3685-21.

и температурно-влажностным условиям (табл. 1). По данным радарной съемки из источника [SRTM, 2022] провели анализ цифровой модели высот (табл. 1), из которого следует, что все пробные площадки располагаются на плоских, очень пологих и слабопокатых склонах разной экспозиции крутизной до пяти градусов, что позволяет в первом приближении пренебречь этими различиями и объединить их в одну категорию по инсоляции (табл. 1). Анализ параметров общей кривизны склонов показал, что все пробные площадки располагаются на склонах в транзитном положении относительно линий поверхностного стока и не подвергаются избыточному увлажнению. Максимальный перепад абсолютных высот между площадками достигает 77 м (табл. 1), обеспечивая пренебрежимо малую (порядка 0,5 градуса) максимальную разницу в температурах за счет перепада высот.

Опираясь на приведенные сведения о генетической принадлежности почв пробных площадок с учетом их местоположения в рельефе, в качестве первого приближения приняли, что почвенные и температурно-влажностные условия пробных пло-

щадок, за исключением содержания в них тяжелых металлов, можно считать одинаковыми по их способности поддерживать растительные сообщества, а причину различий между ними в закономерностях сезонной динамики растительности можно отнести на счет различий в степени загрязнения почвы пробных площадок тяжелыми металлами.

На каждой пробной площадке в сентябре 2019 г. с глубины 0–5 см отобрали по одной пробе почв.

В пробах определяли содержание валовых форм тяжелых металлов методом оптической эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (М-МВИ-80-2008) (табл. 2).

Экспериментальные данные о микробиологической активности почв, искусственно загрязненных пылью из цехов ГОКа (табл. 2), взяты из источника [Бакунович и др., 2016], при этом значение среднего геометрического находили из концентраций аналогичного набора тяжелых металлов.

В качестве меры концентрации фотосинтетически активной биомассы на пробных площадках, каждой из которых был поставлен в соответствие один пиксель, использован NDVI (Normalized

Difference Vegetation Index) — нормализованный относительный вегетационный индекс [Tucker, 1979], значения которого находили по космическим снимкам среднего разрешения MODIS (250 м) и высоко-го разрешения Sentinel — 2 (10 м) с сервера Vega-Science [Лупян и др., 2019].

Обработку материалов дистанционного зондирования и подготовку картографического материала проводили с использованием свободно распространяемых ГИС SAGA [Conrad et al., 2015] и QGIS [https://www.qgis.org].

Временную динамику фотосинтетически активной биомассы q на пробных площадках моделировали с использованием теоретического уравнения роста [Гендугов, Глазунов, 2014; Глазунов и др., 2019]:

$$q = \lambda e^{-kt} t^{-B}. \quad (1)$$

В этом уравнении λ — масштабирующий коэффициент, k — коэффициент скорости увеличения концентрации фотосинтетически активной биомассы в течение вегетационного сезона в результате ее роста и B — коэффициент скорости убывания концентрации фотосинтетически активной биомассы в результате отмирания: и рост, и отмирание идут одновременно с разными, изменяющимися с течением времени, скоростями.

Закономерности пространственного изменения концентрации фотосинтетически активной биомассы q в ответ на содержание z тяжелых металлов в почве пробных площадок моделировали с использованием формулы дозовой зависимости [Гендугов, Глазунов, 2014; Глазунов и др., 2019]:

$$q = \Lambda e^{-K/z} z^{-B}. \quad (2)$$

В этом уравнении Λ — масштабирующий коэффициент, K — коэффициент «скорости» увеличения концентрации фотосинтетически активной биомассы в результате увеличения результирующей концентрации z тяжелых металлов в почве пробных площадок, B — коэффициент «скорости» убывания концентрации фотосинтетически активной биомассы в ответ на увеличение результирующей концентрации z .

Константы уравнения (2) являются индивидуализирующими характеристиками отклика фотосинтетически активной биомассы растительного покрова в форме NDVI на среднюю геометрическую концентрацию z загрязняющих почву тяжелых металлов определенного набора. Математическое обоснование возможности использования результирующей концентрации z (мг/кг) и надления NDVI свойством представлять q в уравнении (2), предполагая использование для него коэффициента перехода от фактической концентрации фотосинтетически активной биомассы q (кг/кг), приведено в работе [Глазунов и др., 2019].

Коэффициенты уравнений (1) и (2) получили приближением этих уравнений к эксперименталь-

ным данным методом наименьших квадратов с использованием алгоритма, созданного на языке программирования Python 3 [Евдокимова и др., 2021], а также библиотек SciPy, NumPy, Pyeq3 и Matplotlib. Для иллюстрации точности приближения модели на графиках наряду с теоретической кривой и экспериментальными точками пунктиром приведены 95% доверительные интервалы. Особые точки модели вычислили анализом производных первого, второго и третьего порядков от вегетационного индекса по времени и по результирующей концентрации тяжелых металлов в почве с использованием свободно распространяемого пакета программ компьютерной алгебры Maxima [Пакет программ..., 2022].

Эмпирическую обеспеченность (p_i) распределения вероятности вычислили по формуле Алексева [Дружинин, 2001]:

$$p_i = (m - 0,25)/(n + 0,5), \quad (3)$$

где m — порядковый номер образца в ряду данных, сортированных по убыванию концентрации стрессора; n — длина ряда.

Ранжирование качества почв по закономерностям отклика растительности (NDVI) на загрязнение почв комплексом поллютантов в окрестностях ГОКа провели на основе показателя состояния почвы p [Яковлев и др., 2009]:

$$p = \gamma e^{\left(\frac{\alpha}{R}\right)}, \quad (4)$$

где R — показатель отклика на нагрузку; α и γ — коэффициенты, определяемые решением системы из двух уравнений (4) для пары значений R функции отклика «доза-эффект», одно из которых получено для максимальной нагрузки s_0 , не выводящей почву из состояния нормы, а второе — для минимальной нагрузки s_* , гарантированно выводящей ее за пределы возможности самовосстановления.

Коэффициенты уравнения (4) находили с использованием пакета программ компьютерной алгебры Maxima [Пакет программ..., 2022].

Результаты

Макрокинетические закономерности сезонной динамики NDVI в окрестностях ГОКа изучены по материалам MODIS и Sentinel-2. Уравнение модели (1) адекватно экспериментальным данным на всех пробных площадках, о чем свидетельствуют значения коэффициента детерминации, близкие к единице (табл. 3).

Степень адекватности модели (2) экспериментальным данным по зависимости вегетационного индекса от результирующей концентрации тяжелых металлов в почвах пробных площадок на 24-й неделе 2019 г. также весьма высока (рис. 1). Высокую точность модели доказывает тот факт, что аналитическая кривая и практически все экспериментальные точки находятся в пределах 95% доверительных интервалов модели (рис. 1).

Таблица 3

Параметры модели (1) сезонной динамики (t , неделя в году) NDVI на пробных площадках в окрестностях ГОКа в 2019 г.

П/п	λ	B	k	R^2	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	q_4	q_4/t_4
MODIS												
1	2,83E+21	1,21E+01	2,64E+02	0,98	13	16	20	22	28	33	0,87	0,040
2	3,29E+27	1,55E+01	3,43E+02	0,84	14	17	20	22	28	32	0,84	0,038
3	2,03E+25	1,38E+01	3,51E+02	0,76	15	19	23	25	32	38	0,76	0,030
4	1,42E+13	0,72E+01	1,87E+02	0,76	13	17	22	26	35	43	0,76	0,029
5	4,43E+36	2,05E+01	4,65E+02	0,81	15	18	21	23	28	31	0,81	0,035
6	1,26E+11	0,60E+01	1,60E+02	0,79	12	17	22	27	37	46	0,79	0,029
7	1,32E+11	0,62E+01	1,47E+02	0,75	11	15	20	24	33	41	0,75	0,031
8	5,42E+21	1,18E+01	3,04E+02	0,79	15	19	23	26	33	39	0,79	0,030
9	8,46E+29	1,67E+01	3,86E+02	0,82	15	18	21	23	29	33	0,82	0,036
10	3,57E+12	0,70E+01	1,66E+02	0,80	11	15	20	24	32	40	0,80	0,033
11	7,18E+32	1,84E+01	4,16E+02	0,79	15	17	21	23	28	32	0,79	0,034
12	7,98E+17	1,01E+01	2,29E+02	0,72	12	16	20	23	29	36	0,72	0,031
13	2,09E+23	1,31E+01	2,92E+02	0,80	13	16	20	22	28	33	0,80	0,036
14	3,60E+63	3,53E+01	8,26E+02	0,87	17	20	22	23	27	31	0,87	0,038
15	1,73E+30	1,70E+01	3,78E+02	0,79	14	17	21	22	27	32	0,79	0,036
16	1,59E+13	0,73E+01	1,83E+02	0,74	12	16	21	25	34	42	0,74	0,030
17	1,57E+28	1,58E+01	3,56E+02	0,80	14	17	21	22	28	33	0,80	0,036
18	1,97E+20	1,14E+01	2,60E+02	0,84	13	16	20	23	29	35	0,84	0,037
Sentinel-2												
1	2,31E+25	14,24	323,40	0,93	14	17	21	23	29	34	0,74	0,0322
2	6,50E+13	7,60	193,33	0,99	13	17	22	25	34	42	0,69	0,0276
3	4,67E+16	9,38	216,10	0,99	12	16	20	23	30	37	0,66	0,0287
4	5,39E+45	24,09	701,56	0,99	20	23	28	29	35	40	1,00	0,0345
5	2,09E+14	7,95	192,58	0,99	11	14	18	24	27	33	0,73	0,0304
6	9,11E+16	9,35	232,23	0,99	13	17	22	25	33	39	0,71	0,0284
7	3,98E+16	9,25	220,51	0,99	13	16	21	24	31	38	0,70	0,0292
8	1,44E+16	9,00	215,86	0,99	13	16	21	24	32	38	0,67	0,0279
9	3,88E+15	8,63	210,76	0,99	13	17	21	24	32	39	0,72	0,0300
10	6,94E+13	7,66	189,09	0,97	12	16	21	25	33	42	0,71	0,0284
11	6,43E+13	7,77	182,06	0,99	12	16	21	23	33	41	0,61	0,0265
12	4,57E+17	9,86	234,73	0,99	13	17	21	24	31	37	0,63	0,0263
13	1,34E+17	9,63	222,24	0,99	12	16	20	23	30	36	0,66	0,0287
14	9,08E+12	7,24	174,64	0,99	12	16	20	24	33	40	0,64	0,0267
15	8,07E+14	8,27	202,53	0,99	13	16	21	24	33	40	0,67	0,0279
16	4,09E+20	11,51	273,36	0,99	14	17	21	24	30	36	0,60	0,0250
17	1,50E+17	9,61	229,24	0,99	13	17	21	24	31	38	0,59	0,0246
18	8,95E+15	8,94	210,07	0,99	12	16	20	23	31	38	0,64	0,0278

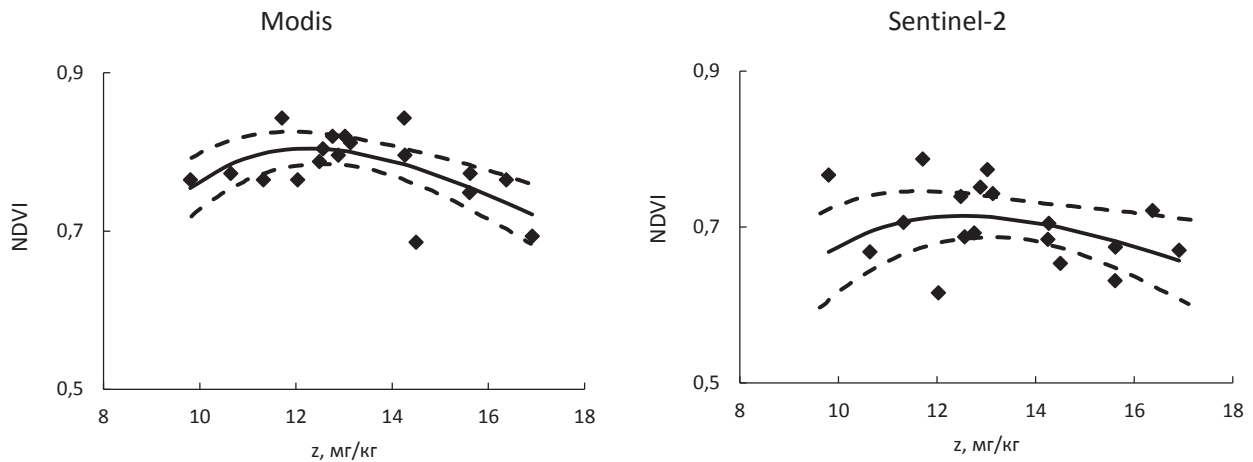


Рис. 1. Дозовая зависимость NDVI от результирующей концентрации тяжелых металлов в почве (точки соответствуют пробным площадкам, сплошные линии — уравнению (2), пунктирные линии — доверительным интервалам для модели)

Модель (2) удовлетворительно описывает опытные данные по микробиологической активности почв, а именно изменению скоростей субстрат-индуцированного (СИД, мкг С /г/ч) и базального дыхания (БД, мкг С /г/ч) в ответ на содержание тяжелых металлов в искусственных почвосмесях, приготовленных из различных сочетаний пыли из цехов ГОКа и нативной почвы [Бакунович и др., 2016] (рис. 2).

Обсуждение

Как было показано ранее [Глазунов и др., 2019], концентрация z_4 , соответствующая максимуму отклика вегетационного индекса q_4 , оказывает определяющее влияние на общность сезонной динамики NDVI, что проявляется в характере экспериментальных зависимостей времени достижения вегетационным индексом своего сезонного максимума, скорости достижения максимума q_4/t_4 и времени (t_1-t_6) начала последовательных фаз роста фотосинтетически активной биомассы на каждой пробной площадке от результирующей концентрации тяжелых металлов в почве на этой площадке.

Подобные закономерности были выявлены и в сезоне 2019 г. Для данных зависимостей характерно наличие слабо заметного максимума при абсциссе 12,5 мг/кг. То есть увеличение концентрации тяжелых металлов в области малых значений приводило к отдалению срока достижения сезонного максимума NDVI (и фотосинтетически активной биомассы)

на площадке, а в области больших — к приближению. Время начала фаз роста NDVI, разграниченных особыми точками модели (t_4-t_4), при этом также смещалось и при увеличении концентрации z в области малых значений сопровождалось отдалением наступления фазы роста, а в области концентраций сверх пороговой — приближением ее наступления.

На основе экспериментальных дозовых зависимостей, полученных в параллельных образцах при биотестировании (рис. 2) и биоиндикации (рис. 1), было проведено обобщение макрокинетических закономерностей отклика живого на антропогенное воздействие (рис. 3). Показатели интенсивности воздействия и биотического отклика предварительно обезразмерили делением на их значения в особых точках q_4 и z_4 соответственно.

Среди множества подходов к реализации задач управления качеством окружающей среды во всем мире широкое применение нашла концепция экологических рисков [Framework for ecological risk assessment, 1992]. Оценка экологического риска представляет собой процедуру, в ходе реализации которой оценивается вероятность того, что в результате экспонирования воздействию одного или нескольких факторов стресса у целевого объекта возникают или могут возникнуть неблагоприятные последствия [Яковлев, Евдокимова, 2022]. Наличие пространственно-распределенных данных по содержанию 12 тяжелых металлов в почвах пробных

Таблица 4

Параметры и особые точки уравнения модели (2) зависимости NDVI от результирующей концентрации тяжелых металлов в почве на 24-й неделе сезона 2019 г.

Аппарат	Λ	B	K	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6	q_4	q_4/z_4
MODIS	3130	2,36	28,9	3,5	5,6	7,9	12,3	18,9	25,4	0,80	0,0656
Sentinel-2	983	2,05	25,66	3,3	5,4	7,7	12,5	19,7	26,7	0,71	0,0570

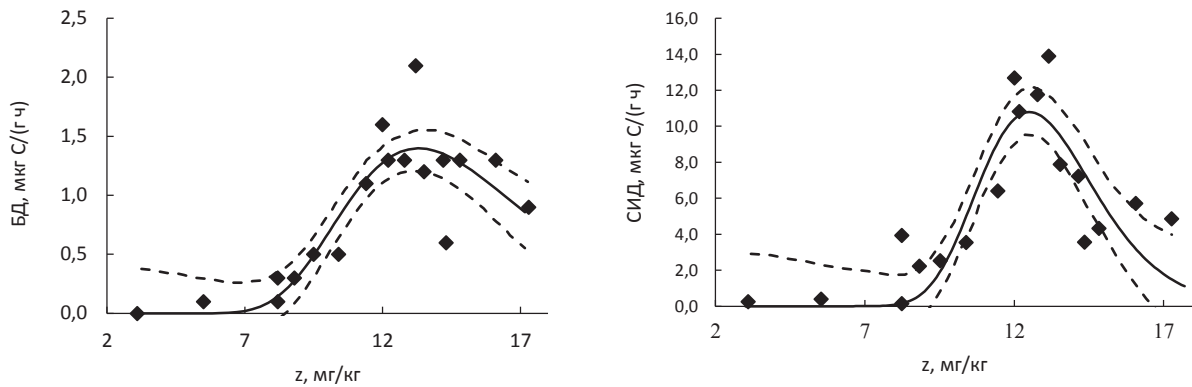


Рис. 2. Зависимость изменения скоростей базального и субстрат-индуцированного дыхания от результирующей концентрации тяжелых металлов в искусственном субстрате

площадок, расположенных в окрестностях ГОКа и испытывающих его негативное воздействие, а также пороговой величины z_4 , установленной при обобщении (рис. 3) макрокинетических закономерностей нескольких откликов на воздействие, позволило выявить закон распределения вероятностей и вычислить для этого распределения эмпирическую обеспеченность p_i по формуле Алексева (3) при длине ряда, равной 18. Вероятность превышения пороговой концентрации составила 74%.

Определяющее значение в установлении пороговых концентраций для загрязняющих веществ в почве имеет время достижения максимума вегетации на исследуемых участках. Расчеты показали, что время достижения максимума вегетации, рассчитанное по материалам двух сенсоров, соответ-

ствует 24-й неделе от начала года. В связи с этим для ранжирования качества почв был выбран снимок высокого разрешения Sentinel-2 от 11 июня 2019 г., который соответствует 24-й неделе. Весь диапазон концентраций комплекса загрязняющих веществ в почве закономерно распределяется по семи диапазонам, выявленным анализом особых точек модели отклика на воздействие (табл. 4).

Опираясь на макрокинетические характеристики отклика фотосинтетически активной биомассы (табл. 4), выявили концентрации тяжелых металлов в почве, соответствующие фоновому уровню [Яковлев, 2022]. Значения фоновых концентраций тяжелых металлов в почве в окрестностях ГОКа находятся в диапазоне $7,7 \leq z < 12,5$ мг/кг. На данном промежутке графика модели (2) увеличение концентрации поллютантов сопровождается ростом фотосинтетически активной биомассы, то есть отмечается явление гормезиса. В точке максимума функции (2) происходит смена стимулирующего действия загрязняющих веществ на угнетающее. Таким образом, $z_4 = 12,5$ мг/кг является пороговой величиной концентрации, которой соответствует максимальное значение отклика вегетационного индекса, равное 0,71.

Принимая во внимание необходимость использования законодательно закрепленной пятиуровневой шкалы качества почвы [Письмо Роскомзема № 3-15/582, 1995] и задавшись границами принятых классовых промежутков на равномерной шкале показателя состояния p (4) [Яковлев и др., 2009], с использованием коэффициентов $\alpha = -1,7$ и $\gamma = 0,02$ рассчитали недостающие значения отклика R для p , равного 0,5 и 0,75. Имея в виду, что угнетающее действие тяжелых металлов проявилось при концентрации z_4 , приняли эту величину за c_0 . Крайне неблагоприятное состояние биологической системы c_* соответствует особой точке z_6 , p в данном случае равен 1 (табл. 5).

На основании диапазонов значений отклика R (табл. 5) в форме NDVI для полученных категорий качества подготовили картосхему ареалов

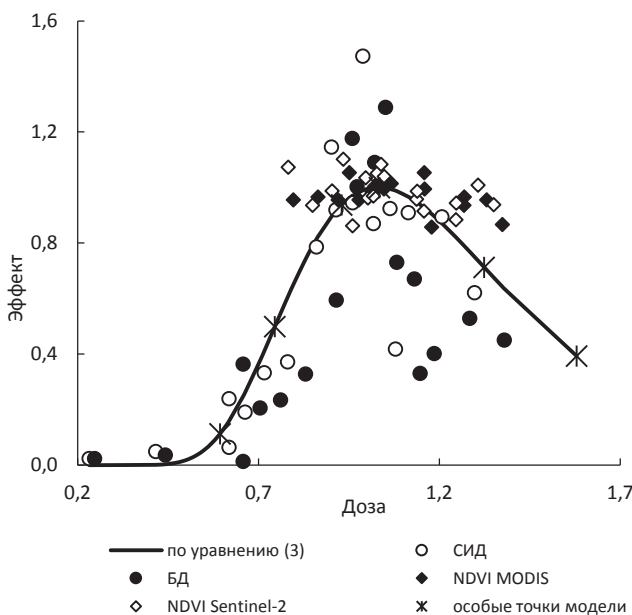


Рис. 3. Обобщение макрокинетических закономерностей отклика живого (q) на антропогенное воздействие (z) на основе экспериментальных дозовых зависимостей (в нормированных переменных), полученных в параллельных образцах при биотестировании и биоиндикации

Таблица 5

Ранжирование качества почв по показателю состояния p [Яковлев и др., 2009]

p	R	c	Категория	Состояние почвы
$0 \leq p < 0,25$	$0,71 < R \leq 1$	$0 < c < 12,5$	I	Фоновое гомеостатическое
$0,25 \leq p < 0,5$	$0,53 < R \leq 0,71$	$12,5 \leq c < 22,6$	II	Переходное
$0,5 \leq p < 0,75$	$0,47 < R \leq 0,53$	$22,6 \leq c < 25,5$	III	Переходное
$0,75 \leq p < 1$	$0,45 < R \leq 0,47$	$25,5 \leq c < 26,7$	IV	Переходное
$p = 1$	$R \leq 0,45$	$c \geq 26,7$	V	Нарушенное. Сильные необратимые изменения

одинаковой устойчивости почв и растительного покрова к действию загрязняющих веществ в зоне воздействия ГОКа с нанесением контура ПЗЗ, превышающей в размерах СЗЗ [Решение Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей..., 2019] (рис. 4). Согласно картосхеме в окрестностях ГОКа преобладают территории, относящиеся к I и II категориям качества. В V категорию попали земли с очень низкими значениями вегетационного индекса, то есть участки, фактически лишенные растительного покрова — сельхозугодья в период уборки культур, городской застройки и карьерные выемки. Данные явления не связаны с загрязнением почвы, связанным с деятельностью ГОКа.

В первую категорию качества почв ожидаемо попали пробные площадки с номерами 1, 2, 4,

5, 6 и 11 (рис. 4), которые расположены в южном и юго-западном направлении от центра СЗЗ, что, вероятно, связано с малой повторяемостью северо-восточных и северных ветров и, соответственно, незначительным переносом пыли в данных направлениях. Вопреки ожиданиям, пункты пробоотбора, находящиеся на юго-востоке от ГОКа, несмотря на минимальное значение годовой повторяемости ветров северо-западного румба, попали во вторую категорию качества почв. Наиболее загрязненными оказались почвы пробных площадок, заложенных на границе СЗЗ.

Заключение

На примере ГОКа апробирован подход к обоснованию зоны воздействия антропогенного источника на наземные экосистемы на основе анализа

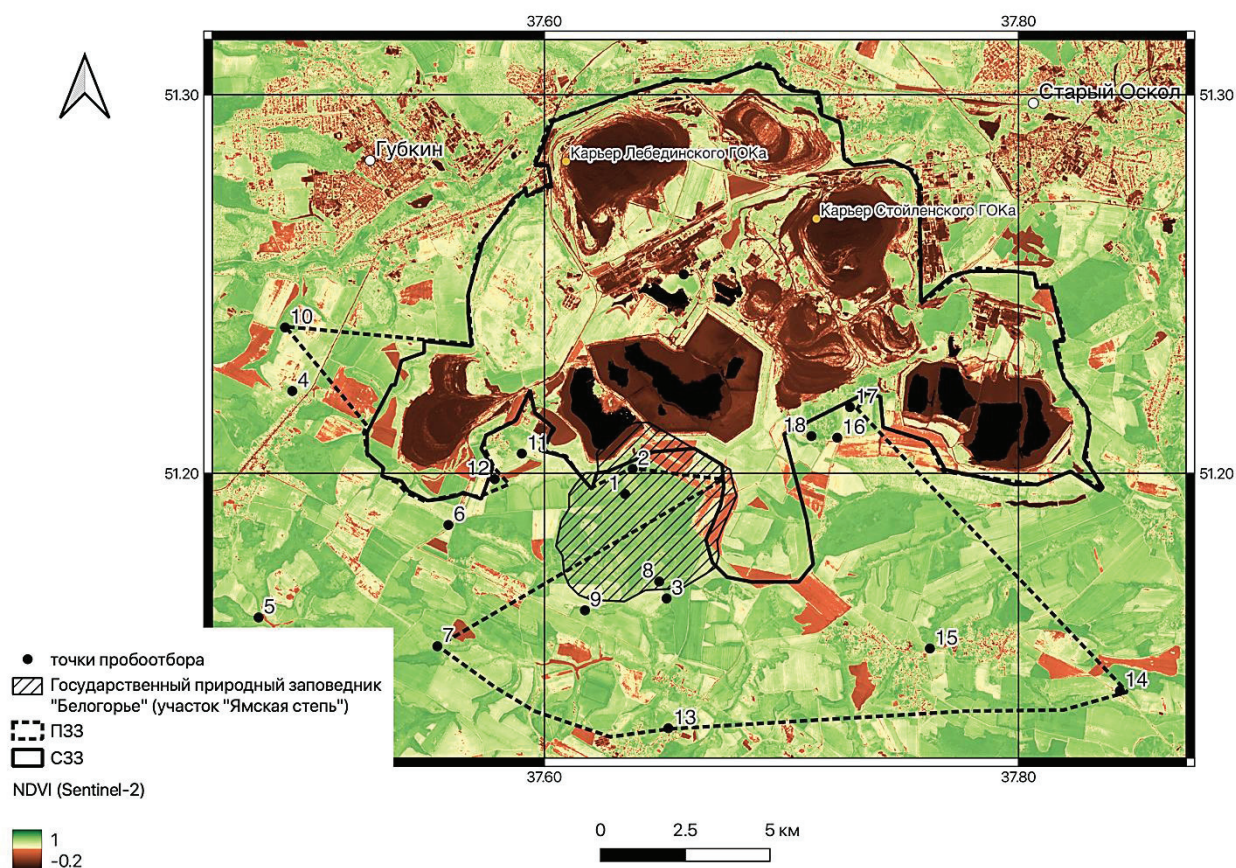


Рис. 4. Природно-защитная зона горно-обогатительного комбината

закономерностей временной и пространственной изменчивости фотосинтетически активной биомассы (NDVI), выявленных по данным дистанционного зондирования Земли высокого (Sentinel-2) и среднего разрешения (MODIS) с использованием теоретического уравнения [Гендугов, Глазунов, 2014]. Анализом особых точек теоретического уравнения зависимости концентрации фотосинтетически активной биомассы (NDVI) от результирующей концентрации поллютантов в почве выявлена предельно допустимая концентрация тяжелых металлов в почве. Весь диапазон концентраций комплекса загрязняющих веществ в почве закономерно распределяется по семи диапазонам, выявленным анализом особых точек модели отклика на воздействие, характеризуемым общностью макрокинетических показателей отклика. Предельно допустимой концентрацией является та, при которой происходит смена стимулирующего действия загрязняющих веществ на угнетающее. Она соответствует точке максимума модели. Результаты ее определения по материалам MODIS и Sentinel-2 равны 12,3 и 12,5 мг/кг соответственно.

Предложен способ обобщения макрокинетических закономерностей отклика живого на антропогенное воздействие путем обезразмеривания показателей отклика и воздействия делением на их значения в точках максимума модели.

Результаты оценки экологических рисков показали, что вероятность превышения пороговой концентрации, установленной при обобщении макрокинетических закономерностей отклика на воздействие, составила 74%.

На основе принятой в природоохранной практике пятиуровневой шкалы качества почвы и показателя ее состояния p провели ранжирование качества почв и растительного покрова в окрестностях ГОКа. Ареалы одинаковой устойчивости почв и растительного покрова к действию загрязняющих веществ в зоне воздействия ГОКа нанесены на топографическую основу. В окрестностях ГОКа преобладают территории, относящиеся к I и II категориям качества почв, то есть характеризующиеся фоновым и переходным состоянием. Выделена природно-защитная зона предприятия, превышающая в размерах санитарно-защитную.

Информация о финансировании работы

Исследование выполнено частично при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды», а также в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Почвенные информационные системы и оптимизация использования почвенных ресурсов» (номер ЦИТИС: 1210 40800147-0).

Благодарность

Авторы выражают глубокую благодарность д. б. н., профессору Г.П. Глазунову и канд. ф.-м. наук., вед. науч. сотр. В.М. Гендугову за создание теоретической модели, ставшей основой для оценки и нормирования состояния почв и растительного покрова в зоне воздействия промышленного предприятия.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакунович Н.О., Хохлова О.С., Мякшина Т.Н. и др. Загрязнение тяжелыми металлами и дыхательная активность микроорганизмов в нативных почвах и искусственных субстратах (на примере заповедного участка «Ямская степь») // Бюллетень Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева. 2016. № 85. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2016-85-131-149>
2. Гендугов В.М., Глазунов Г.П. Макрокинетическая модель микробного роста на многокомпонентном субстрате // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2014. № 3.
3. Gendugov V.M., Glazunov G.P. Macrokinetic model of microbial growth on a multicomponent substrate // Moscow Univ. Soil Sci. Bull. 2014. Vol. 69. <https://doi.org/10.3103/S0147687414030028>
3. Глазунов Г.П., Гендугов В.М., Евдокимова М.В. и др. Макроскопическая кинетика временной и пространственной изменчивости вегетационного индекса NDVI на территории заповедника «Ямская степь» в условиях загрязнения почвы тяжелыми металлами // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 2. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-2-111-127>
4. График ветра в Губкине [Электронный ресурс]. 2022. <https://world-weather.ru/archive/russia/gubkin/> (дата обращения 01.09.2022).
5. Дружинин В.С., Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. СПб., 2001.
6. Евдокимова М.В., Глазунов Г.П., Яковлев А.С. и др. Оценка экологического состояния земель, загрязненных комплексом тяжелых металлов, в окрестностях города Норильска за период с 2004 по 2019 г. по материалам NDVI MODIS с сервера Vega-science // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 4. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-149-165>
7. Лунян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А. и др. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 3. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170>
8. М-МВИ-80-2008. Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии. СПб., 2008.

9. Пакет программ компьютерной алгебры Maxima. URL: <https://sourceforge.net/projects/maxima/> (дата обращения: 01.09.2022).

10. Письмо Роскомзема № 3-15/582 от 27.03.1995 г. «О «Методических рекомендациях по выявлению деградированных и загрязненных земель»» (вместе с «Методическими рекомендациями по выявлению деградированных и загрязненных земель», утв. Роскомземом 28.12.1994 г., Минсельхозпродом России 26.01.1995 г., Минприроды России 15.02.1995 г.).

11. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ № 74 от 25.09.2007 г. «О введении в действие новой редакции санитарно-эпидемиологических правил и нормативов СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов»».

12. Решение Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека «Об установлении санитарно-защитной зоны промышленной площадки АО «Лебединский ГОК» с учетом перспективы развития до 2038 года, расположенной по адресу: Российская Федерация, Белгородская область, г. Губкин, промышленная зона, промплощадка ЛГОКА» от 19.04.2019.

13. *Русаков А.В.* Почвы и почвенный покров Ямской степи. СПб., 2012.

14. СанПиН 1.2.3685-21. «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ № 2 от 28.01.2021 г.

15. Устойчивое развитие: политика, подходы, принципы. URL: <https://www.metalloinvest.com/development/> (дата обращения 29.09.2022 г.).

16. Федеральный закон № 52-ФЗ от 30.03.1999 г. «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения».

17. Федеральный закон № 96-ФЗ от 04.05.1999 г. «Об охране атмосферного воздуха».

18. Цифровая модель рельефа. [Электронный ресурс]: SRTM Digital Elevation Data. Режим доступа: <http://srtm.csi.cgiar.org/> (дата обращения 20.09.2021 г.).

19. *Яковлев А.С.* Вопросы экологического нормирования и установления фоновых значений свойств почв природных и природно-антропогенных объектов // Почвоведение. 2022. № 2.

Yakovlev A.S. Issues of environmental regulation and establishment of background values of soil properties of natural and natural anthropogenic objects // Eurasian Soil Sc. 2022. Vol. 55. <https://doi.org/10.1134/S1064229322020144>

20. *Яковлев А.С., Гендугов В.М., Глазунов Г.П. и др.* Методика экологической оценки состояния почвы и нормирования ее качества // Почвоведение. 2009. № 8.

Yakovlev A.S., Gendugov V.M., Glazunov, G.P. et al. Methodology for the environmental assessment of the soil state and regulation of the soil quality // Eurasian Soil Sc. 2009. Vol. 42. <https://doi.org/10.1134/S1064229309080109>

21. *Яковлев А.С., Евдокимова М.В.* Подход к установлению зон экологической ответственности предприятий и уровней природно-антропогенного фона почв // Почвоведение. 2022. № 9.

Yakovlev A.S., Evdokimova M.V. Approach to Establishment of Environmental Responsibility Zones of Enterprises and Natural–Anthropogenic Background Soil Values // Eurasian Soil Sc. 2022. Vol. 55. <https://doi.org/10.1134/S1064229322090150>

22. *Яковлев А.С., Евдокимова М.В.* Подходы к нормированию загрязнения почв в России и зарубежных странах // Почвоведение. 2022. № 5.

Yakovlev A.S., Evdokimova M.V. Approaches to the Regulation of Soil Pollution in Russia and Foreign Countries // Eurasian Soil Sc. 2022. Vol. 55. <https://doi.org/10.1134/S1064229322050131>

23. *Conrad O., Bechtel B., Bock M. et al.* System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 // Geosci. Model Dev. 2015. Vol. 8, № 7.

24. Framework for ecological risk assessment. Washington, DC: Risk Assessment Forum, U.S. Environmental Protection Agency. 1992. EPA/630/R-92/001.

25. *Tucker C.J.* Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // Remote Sens Environ. 1979. Vol. 8, № 2.

Поступила в редакцию 14.10.2022

После доработки 15.11.2022

Принята к публикации 01.12.2022

ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF SOIL AND VEGETATION IN THE VICINITY OF A MINING AND PROCESSING PLANT ON THE BASIS OF EARTH REMOTE-SENSING DATA

M. V. Evdokimova, A. S. Yakovlev

Spatial and temporal variability of the vegetation index were investigated in the vicinity of the anthropogenic source of heavy metals. The analysis of the special points of the theoretical equation of the dependence of the concentration of photosynthetically active biomass on the resulting concentration of pollutants in the soil revealed the maximum permissible concentration of heavy metals in the soil. The results of its determination in the northern forest-steppe under the current level of anthropogenic pressure, according to MODIS materials, amounted to 12,3, according to Sentinel-2 — 12,5 mg/kg, respectively. A method for generalizing the macrokinetic patterns of the response of the living organisms to anthropogenic impact is proposed. The results of the environmental risk assessment showed that the probability of exceeding the threshold concentration is 74%. Based on the five-level quality scale and the indicator of soil state, the quality of soils and vegetation cover was ranked. The areas of the same resistance of soils and vegetation to the action of pollutants in the plant impact zone were mapped. Territories near the plant mostly correspond to the I and II categories of soil quality. The natural protection zone of the enterprise is allocated, and background territories are defined.

Key words: MODIS, Sentinel-2, NDVI, environmental monitoring, environmental assessment, MPC, seasonal dynamics of photosynthetically active biomass.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Евдокимова Мария Витальевна, канд. биол. наук, ст. науч. сотр. каф. земельных ресурсов и оценки почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,
e-mail: soil.resources@mail.ru

Яковлев Александр Сергеевич, докт. биол. наук, зав. каф. земельных ресурсов и оценки почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,
e-mail: yakovlev_a_a@mail.ru