Оценка экологического состояния земель, загрязнённых комплексом тяжёлых металлов, в окрестностях города Норильска за период с 2004 по 2019 г. по материалам NDVI MODIS с сервера Вега-Science

М. В. Евдокимова, Г. П. Глазунов, А. С. Яковлев, И. О. Плеханова, Р. А. Аймалетдинов, М. В. Шестакова

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова Москва, 119991, Россия E-mail: mawkae@gmail.com

В статье проанализированы закономерности пространственной и временной (межгодовой и внутрисезонной) изменчивости вегетационного индекса NDVI в окрестностях источника поступления в окружающую среду тяжёлых металлов в зависимости от их концентрации в почвах. Целью исследования было научное обоснование возможности объективной количественной оценки экологического состояния земель, загрязнённых комплексом тяжёлых металлов, по материалам дистанционного зондирования Земли на базе теоретической модели отклика живого в форме NDVI на воздействие стрессоров в виде комплекса тяжёлых металлов с её предварительной параметризацией на основе подспутниковых измерений. Установлено, что внутрисезонная динамика NDVI и отклик экосистемы в форме NDVI на содержание комплекса тяжёлых металлов в почвах в окрестностях Норильска, испытывающих воздействие металлургического производства, удовлетворительно описываются теоретической моделью. Открывается возможность обобщения результатов спутниковых (NDVI) и подспутниковых (концентрация тяжёлых металлов в почве) наблюдений с получением оценки экологического состояния земель для целей обоснования мер по восстановлению их качества и разработки региональных нормативов качества почв.

Ключевые слова: экологическое состояние, биоиндикация, математическое моделирование, анализ данных дистанционного зондирования Земли, вегетационный индекс, оценка рисков, природный фон

Одобрена к печати: 24.07.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-149-165

Введение

Возрастающее влияние человека на окружающую среду сопровождается ростом вероятности негативных проявлений в состоянии экосистем, в связи с чем оценка их состояния становится актуальной задачей. Критериями для оценки степени загрязнения почв химическими веществами-загрязнителями на землях сельскохозяйственного назначения и населённых пунктов становятся предельно допустимые концентрации и ориентировочно допустимые концентрации в почвах, ориентированные на благополучие человека. Однако в большинстве случаев за пределами территорий санитарно-защитных зон промышленных предприятий реципиентами химического загрязнения оказываются экосистемы, для оценки состояния которых санитарно-гигиенические критерии не применимы. В таких случаях прибегают к экспертным оценкам, одной из разновидностей которых выступает процедура оценки экологических рисков (Guidelines..., 1998). Имеющиеся рекомендации по оценке рисков ориентируют на исследование зависимостей «воздействие на экосистему – ответ экосистемы» с целью выявления пороговых уровней воздействия (в случае химических стрессоров — их концентраций) (Using..., 2017). В методических рекомендациях по оценке рисков содержатся требования к постановке исследования зависимостей вида «доза – эффект» и рекомендуемые эмпирические формулы для подгонки к результатам опытов с целью вычисления пороговых значений воздействия стрессора, необходимых для нормирования и оценки состояния (Hardy et al., 2017). Все рекомендуемые формулы относятся к логистическому типу, пригодному для

аппроксимации результатов биотестирования в лабораторных условиях, но не всегда пригодному для аппроксимации результатов биоиндикации в природных условиях, когда проявляется характерное для экосистем нелинейное реагирование на воздействие стрессоров. В связи с этим ранее Г. П. Глазуновым с соавторами (2019) был предложен и апробирован подход к экологической оценке состояния земель, испытывающих воздействие стрессоров, поступающих по воздуху в составе пыли с горно-обогатительного комбината, на основе нелинейной модели с использованием величины NDVI (Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) в качестве количественного показателя отклика экосистемы на воздействие стрессоров и концентрации тяжёлых металлов в почве в качестве показателя интенсивности воздействия стрессора.

Цель данной работы состоит в проверке изложенного подхода и модели (Глазунов и др., 2019) на ином объекте (окрестности Норильска), в иных физико-географических условиях, с иным химизмом загрязнения и обеспеченными возможностями учёта размеров зоны воздействия источника загрязнения. Задачи исследования: 1) определение макрокинетических характеристик внутрисезонной динамики NDVI для опорных точек, обеспеченных наземными измерениями, в рамках теоретической модели (Гендугов, Глазунов, 2014); 2) выявление закономерности в пространственном распределении значений NDVI в зоне воздействия комбината; 3) обоснование ранжирования концентрации тяжёлых металлов и значений NDVI, отражающего степень экологической безопасности для зоны воздействия металлургического комбината г. Норильска; 4) выявление эмпирической зависимости концентрации тяжёлых металлов в почве от расстояния до источника загрязнения и от среднегодовой доли ветров, направленных от этого источника к рассматриваемому участку (пикселю); 5) оценка устойчивости выявленных закономерностей во времени.

При решении поставленных задач авторы опирались на собственные разработки и на методические подходы, описанные в работах Института космических исследований РАН (ИКИ РАН), Института леса им. В. Н. Сукачёва СО РАН и на материалы сервиса Bera-Science (Лупян и др., 2019).

Объекты и методы

Район исследования расположен на севере Красноярского края, в южной части п-ова Таймыр с суровым климатом субарктического типа, характеризуемым продолжительной зимой (около 280 дней с морозами), полярной ночью (с 30 ноября по 13 января), коротким летом, длящимся с конца июня по конец августа, и чрезвычайно высокой активностью ветров, среди которых преобладают юго-восточные и северо-западные (https://world-weather.ru) (*puc. 1*).



Рис. 1. Роза ветров для г. Норильска

В районе исследований, согласно классификации ИКИ РАН (http://sci-vega.ru/maps), преобладают избыточно-увлажнённые ландшафты с преимущественно травянистой растительностью, с вкраплениями низкорослой кустарниковой и древесной растительности и выходы горных пород с открытыми грунтами и урбанизированными территориями (*puc. 2*, см. с. 151).

Почвенный покров (*рис. 3*, см. с. 151) представлен в основном тундровыми и таёжными глеевыми торфянисто-перегнойными почвами и тундровыми подбурами заболоченных и избыточно увлажнённых территорий (http://gis.krasn.ru). Поверхностные, корнеобитаемые горизонты этих почв характеризуются сходством основных свойств, обеспечивающих поддержание растительного покрова.



Рис. 2. Карта растительности исследуемой территории



- Норильск
- О Пробные площадки
- Арктотундровые перегнойно-глеевые, почвы пятен и тундровые глеевые торфянистые и торфяные Перегнойно-карбонатные тундровые
- Перегнойно-карбонатные
- Подбуры тундровые (без разделения)
- 🔲 Каменистые россыпи
- Таёжные глеевые торфянисто-перегнойные (глеезёмы торфянисто-перегнойные таёжные)
- П Таёжные торфянисто-перегнойные высокогумусные неоглеенные
- Тундровые глеевые торфянисто-перегнойные (глеезёмы торфянистые и перегнойные тундровые)
- 🔲 Тундровые глеевые торфянисто-перегнойные, почвы пятен и мерзлотных трещин
- 🔲 Тундровые глеевые торфянисто-перегнойные, тундровые глеевые торфянистые и торфяные
- 🔲 Тундровые глеевые торфянистые и торфяные, торфянисто- и торфяно-глеевые болотные и почвы пятен

Рис. 3. Почвенная карта исследуемой территории



Рис. 4. Карта рельефа исследуемой территории



Рис. 5. Карта крутизны склонов исследуемой территории



Рис. 6. Карта экспозиции склонов исследуемой территории

И почвы, и растительный покров в окрестностях Норильска испытывают воздействие металлургического комбината в форме газово-пылевых выбросов, в состав которых входят медь, никель, кобальт, железо, марганец и сера (Корец и др., 2006; Яковлев и др., 2008). Точки отбора проб располагали в сходных почвенно-гидрологических и геоморфологических условиях (*рис.* 2–6, см. с. 152). Необходимые для целей данной работы концентрации (*табл. 1*) приоритетных тяжёлых металлов в поверхностном (0–5 см) слое почв, подверженном воздействию разной интенсивности, возрастающей с приближением к источнику загрязнения в Норильске, для опорных точек были определены ранее (Яковлев и др., 2008).

Расстояние, км	Почвы	Угодья	Cu	Ni	Со	ζ*	NDVI
1	1	1	972	512	59	309	_
2			166	275	49	131	
3		2	440	285	16	126	0,54
14	2		213	168	29	101	0,76
15			411	149	10	86	0,77
22			116	112	43	82	0,79
25			98	103	16	54	0,78
100			29	30	15	24	0,42
Кларк (мир)			20	40	8	19	_

Таблица 1. Содержание соединений тяжёлых металлов (мг/кг) в поверхностном (0–5 см) слое почв на различном расстоянии от Норильска в направлении на северо-восток (Яковлев и др., 2008)

П р и м е ч а н и е: почвы: 1 — тундровые глеевые торфянисто-перегнойные (глееземы торфянистые и перегнойные тундровые), 2 — таёжные глеевые торфянисто-перегнойные (глееземы торфянисто-перегнойные таёжные); угодье: 1 — открытые грунты без растительности, 2 — болота; *z** — среднее геометрическое из валовых концентраций Cu, Ni и Co в почве; NDVI — максимальные за сезон значения в 2004 г. по MODIS.

В качестве оценки расчётного максимума NDVI для каждого пикселя использовали максимальные за вегетационный сезон наблюдённые значения по материалам MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (7-дневный, интерполяция) с использованием сервиса Bera-Science (http://sci-vega.ru) (Лупян и др., 2019) (см. *табл. 1*).

Материалы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в форме NDVI анализировали с использованием теоретической модели (Гендугов, Глазунов, 2014), решение которой в предположении NDVI = *q* имеет вид:

$$q = \alpha(tz)^{-B} \cdot \exp\left(\frac{-\varkappa}{tz}\right),\tag{1}$$

в котором *t* — время от начала календарного года; *z* — среднее геометрическое из начальных концентраций учитываемых компонентов субстрата; α , *B*, \varkappa — эмпирические константы, имеющие структуру. Для выявления закономерностей сезонной динамики анализировали сезонные ряды NDVI для каждого пикселя опорных точек, что означает выполнение условия *z* = const, внесение которого в константы уравнения приводит формулу (1) к виду, полученному ранее в работе (Гендугов, Глазунов, 2014):

$$q = \lambda t^{-B} \cdot \exp\left(-\frac{k}{t}\right). \tag{2}$$

В уравнении (2): λ — масштабирующий коэффициент; \varkappa — коэффициент скорости увеличения NDVI в результате прироста растительной массы; *B* — коэффициент скорости убывания NDVI в результате отмирания растительных клеток. Предполагается, что процессы, приводящие и к увеличению, и к уменьшению NDVI со временем, протекают одновременно. Для выявления закономерностей отклика растительности на загрязнение анализировали зависимость NDVI (или производных от него макрокинетических характеристик сезона) от концентрации тяжёлых металлов в почве *z* при фиксированном времени для однородных во всех отношениях, кроме загрязнения почвы, пикселей, что означает выполнение условия *t* = const, внесение которого в константы уравнения (1) приводит его к виду, полученному ранее в работе (Гендугов, Глазунов, 2014):

$$q = \Lambda z^{-B} \cdot \exp\left(-\frac{K}{z}\right). \tag{3}$$

В уравнении (3): Λ — масштабирующий коэффициент; K — коэффициент, характеризующий интенсивность возрастания фотосинтетически активной биомассы в ответ на рост интенсивности воздействия (в форме увеличения показателя концентрации тяжёлых металлов, z); B — коэффициент, характеризующий интенсивность убывания фотосинтетически активной биомассы в ответ на рост интенсивности воздействия (в фазовой плоскости «отклик — воздействие» отклик в форме NDVI одновременно и возрастает, с коэффициентом «скорости» K, и убывает, с коэффициентом «скорости» B, по мере увеличения воздействия в форме χ , среднего геометрического из концентраций тяжёлых металлов в почве).

Загрязняющие вещества, находящиеся в почве, оказывают совокупное воздействие на реципиентов этого загрязнения, степень которого зависит от класса опасности веществ и величин их концентрации в почве. С использованием уравнения (3) удаётся не только оценить совокупное воздействие химических соединений в виде результирующей концентрации *z*, но и выявить ведущие агенты этого загрязнения (Гендугов, Глазунов, 2014), зачастую совпадающие с перечнем маркерных для данного вида промышленного производства веществ. При этом компоненты субстрата, не учитываемые явно, учитываются неявно — в значениях коэффициентов уравнения. Уравнение (3) не противоречит общепринятым представлениям (Колесников и др., 2009; Плеханова, Золотарева, 2021; Титов и др., 2014), что в малых дозах загрязняющие вещества, находящиеся в почвах, обладают стимулирующим действием на высшие растения, при этом концентрация фотосинтетически активной биомассы растёт после достижения оптимальных значений, наступает их угнетение, а концентрация фотосинтетически активной биомассы убывает. Рис. 7. Зависимость вегетационного индекса NDVI от показателя концентрации тяжёлых металлов в почве в окрестностях Норильска в 2004 г.: точки — эксперимент; сплошная линия — по модели (3); пунктирная линия — доверительные интервалы

Особые точки модели — шесть результирующих концентраций $(z_1 - z_6)$ тяжёлых металлов в почве, которые получаются анализом первой, второй и третьей производных от вегетационного индекса по *z* и используются в качестве опорных при



ранжировании загрязнённой территории по степени отклика на действие стрессора (Глазунов и др., 2019). Особые точки модели (3) разграничивают семь промежутков в фазовой плоскости зависимости показателя роста (q = NDVI) от результирующей концентрации стрессора z. Каждый из этих промежутков характеризуется собственным сочетанием состояний кинетических характеристик отклика биологической системы на действие стрессора (Гендугов и др., 2011).

Значения коэффициентов уравнений (2) (*табл. 2*) и (3) (*табл. 3*) находили подгонкой по способу наименьших квадратов с использованием алгоритма, созданного авторами на языке программирования Python 3 на основе примеров J. Phillips (https://bitbucket.org/zunzuncode/pyeq3/src/master), а также библиотек SciPy, NumPy, Pyeq3 и Matplotlib. Для иллюстрации точности приближения модели на *рис.* 7, наряду с теоретической кривой и экспериментальными точками, синим пунктиром приведены 95%-е доверительные интервалы.

Параметры	2004 г.	2005 г.	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.				
3 км											
λ	5,47E+94	2,45E+32	_								
В	4,85E+01	1,11E+01	1,86E+01	8,79E+00	1,62E+01	1,74E+01					
k	1,62E+03	3,18E+02	5,43E+02	2,81E+02	5,14E+02	4,85E+02					
t_4	33	29	29	32	32	28					
R^2	0,94	0,94	0,97	0,94	0,97	0,94					
14 км											
λ	2,11E+32	1,29E+42	2,18E+89	1,31E+53	6,75E+53	3,96E+63	2,90E+41				
В	1,67E+01	2,20E+01	4,69E+01	2,78E+01	2,80E+01	3,30E+01	2,17E+01				
k	5,41E+02	6,68E+02	1,40E+03	8,35E+02	8,73E+02	1,03E+03	6,62E+02				
t_4	32	30	30	30	31	31	31				
R^2	0,98	0,91	0,87	0,88	0,94	0,93	0,99				
			15	КМ							
λ	3,02E+32	1,72E+37	1,01E+38	1,07E+47	2,80E+53	1,96E+57	1,61E+57				
В	1,68E+01	1,96E+01	1,98E+01	2,47E+01	2,78E+01	2,98E+01	2,99E+01				
k	5,35E+02	5,83E+02	6,15E+02	7,34E+02	8,62E+02	9,27E+02	9,03E+02				
t ₄	32	30	31	30	31	31	30				
R^2	0,98	0,94	0,91	0,98	0,98	0,93	0,96				

Таблица 2. Параметры модели (2) внутрисезонной динамики вегетационного индекса NDVI для пробных площадок

Продолжение табл. 2

Параметры	2004 г.	2005 г.	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.	
	I	1	22	КМ	I	<u> </u>	1	
λ	9,35E+49	1,00E+51	1,63E+47	3,41E+39	6,57E+79	3,41E+39	1,48E+113	
В	2,56E+01	2,66E+01	2,45E+01	2,06E+01	4,13E+01	2,06E+01	5,93E+01	
k	8,51E+02	8,13E+02	7,70E+02	6,33E+02	1,31E+03	6,33E+02	1,77E+03	
t_4	33	31	31	31	32	31	30	
R^2	0,92	0,88	0,90	0,91	0,92	0,98	0,99	
			25	КМ				
λ	1,65E+24	1,24E+76	1,12E+43	1,20E+35	2,54E+68	1,00E+55	1,31E+64	
<i>B</i>	1,25E+01	4,02E+01	2,24E+01	1,83E+01	3,54E+01	2,86E+01	3,34E+01	
k	4,09E+02	1,16E+03	7,02E+02	5,64E+02	1,12E+03	8,95E+02	1,03E+03	
t_4	33	29	31	31	32	31	31	
R^2	0,91	0,96	0,96	0,97	0,98	0,95	0,99	
			100	км				
λ	2,53E+69	2,34E+21	1,54E+51	2,44E+57	4,08E+166	2,20E+58	—	
В	3,61E+01	1,15E+01	2,65E+01	3,01E+01	8,56E+01	3,03E+01		
k	1,12E+03	3,21E+02	8,47E+02	9,06E+02	2,79E+03	9,51E+02		
t_4	31	28	32	30	33	31		
R^2	0,97	0,99	0,94	0,76	0,97	0,92		
Параметры	2011 г.	2012 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.
				3 км				1
λ	2,52E+21	1,28E+35	_	_	2,36E+32	3,57E+38	2,98E+51	1,81E+26
В	1,15E+01	1,87E+01			1,71E+01	2,05E+01	2,72E+01	1,38E+01
k	3,25E+02	5,38E+02			5,19E+02	5,89E+02	8,02E+02	4,28E+02
t_4	28	29			30	29	29	31
R^2	0,96	0,98			0,98	0,95	0,99	0,97
				14 км				1
λ	2,68E+29	7,05E+37	3,39E+34	_	9,31E+59	2,86E+40	1,29E+26	3,32E+27
В	1,57E+01	1,98E+01	1,81E+01		3,16E+01	2,12E+01	1,38E+01	1,43E+01
k	4,40E+02	5,96E+02	5,42E+02		9,28E+02	6,42E+02	4,02E+02	4,46E+02
t_4	28	30	30		29	30	29	31
R^2	0,97	0,92	0,99		0,93	0,95	0,97	0,87
				15 км	·			
λ	1,63E+24	1,35E+44	1,03E+44	9,83E+34	8,10E+51	1,83E+36	2,48E+29	2,68E+30
В	1,30E+01	2,31E+01	2,29E+01	1,82E+01	2,74E+01	1,90E+01	1,55E+01	1,58E+01
k	3,57E+02	6,92E+02	7,06E+02	5,61E+02	7,98E+02	5,69E+02	4,59E+02	4,94E+02
t_4	27	30	31	31	29	30	30	31
R^2	0,89	0,98	0,92	0,98	0,96	0,94	0,95	0,88
				22 км				
λ	6,76E+34	1,55E+54	2,67E+79	8,53E+49	1,03E+56	4,78E+42	1,51E+38	5,83E+50
В	1,85E+01	2,82E+01	4,12E+01	2,60E+01	2,94E+01	2,23E+01	2,00E+01	2,63E+01
k	5,34E+02	8,70E+02	1,30E+03	8,00E+02	8,78E+02	6,77E+02	6,05E+02	8,33E+02

Окончание табл. 2

	1	1		1			(1
Параметры	2011 г.	2012 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.
t ₄	29	31	32	31	30	30	30	32
R^2	0,97	0,96	0,95	0,98	0,90	0,96	0,99	0,88
25 км								
λ	1,58E+30	9,14E+44	1,05E+100	1,90E+76	1,23E+48	1,52E+43	2,95E+40	8,95E+49
В	1,60E+01	2,35E+01	5,25E+01	3,99E+01	2,53E+01	2,26E+01	2,12E+01	2,59E+01
k	4,61E+02	7,19E+02	1,56E+03	1,20E+03	7,53E+02	6,85E+02	6,37E+02	8,17E+02
t ₄	29	31	30	30	30	30	30	32
R^2	0,96	0,97	0,95	0,99	0,96	0,97	0,96	0,93
				100 км				
λ	1,57E+52	4,11E+38	_	2,14E+48	1,29E+27	2,16E+99	1,66E+33	1,08E+42
В	2,82E+01	2,03E+01		2,53E+01	1,45E+01	5,25E+01	1,73E+01	2,18E+01
k	7,49E+02	6,04E+02		7,76E+02	4,09E+02	1,52E+03	5,45E+02	6,95E+02
t ₄	27	30		31	28	29	31	32
R^2	0,93	0,97		0,97	0,96	0,90	0,97	0,93

* — коэффициент детерминации.

	(0)	~ ~ ~		· ··		/ \
$Tabauua \prec K$ ouerouru Mononia	131	aboutteet Locobt	IV TOHAV (ME/VE	A LI LIV VIDO DALLIOOTI	OT RETOURNED	(IZM)
$I u \cup I u u u u \cup I \cup I \cup I \cup I \cup I \cup I $	1.21	. αθειμίεται θεθυί			ОГИСТОЧНИКА	
	(-)	,		,		()

Константы модели	Статистические параметры	Oc	обые точ	Расстояние		
A = 485	Средняя квадратическая ошибка: 0,04	z	мг/кг	q	б/р	KM
K = 1,26 R = 72.0	Коэффициент детерминации (R^2): 0,91 Критерий Фициера (<i>E</i> test): 14,78	1	10,9	1	0,03	577
D = 72,9	-критерий (<i>p</i> -value): 0,03		19,4	2	0,27	190
	Оценка правдоподобия модели (log-likelihood): 10,28 Информационный критерий Акаике (AIC): -2 43	3	28,5	3	0,55	90
		4	57,9	4	0,83	23
	Байесовский информационный критерий	5	96,3	5	0,72	9
	(BIC): -2,53		134,2	6	0,59	5

С использованием пакета программ компьютерной алгебры Maxima (https://sourceforge. net/projects/maxima) и полученных указанным способом коэффициентов моделей (2) и (3), а также анализом производной первого порядка от q = NDVI по t для модели (2) рассчитывали значение максимума t_4 (см. *табл. 2*), а затем анализом производных первого, второго и третьего порядка по z находили особые точки для модели (3) (см. *табл. 3, рис. 7*).

Связь между степенью загрязнения почвы z и удалённостью x от источника загрязнения (Норильска) в направлении на северо-восток искали по экспериментальным данным (см. *табл. 1*) в форме:

$$z = \alpha x^{-\beta},\tag{4}$$

где α , β — эмпирические константы, а подобную связь для произвольного направления, характеризуемого известной из многолетней розы долей ветров (см. *рис. 1*) данного направления *f*, искали в форме:

$$x = \sigma z^{-\varepsilon} f^{-\mu}, \tag{5}$$

где σ, ε, μ — эмпирические константы, в обоих случаях методом подбора, исходя из представлений о траекториях частиц, переносимых ветром (Гендугов, Глазунов, 2007), с использованием пакета программ MS Office (https://www.microsoft.com). Определив константы уравнений (5) и (3) и особые точки уравнения (3), вдоль каждого из основных восьми румбов отложили найденные по формуле (5) значения x для абсциссы особых точек z_4 и соединили их прямыми линиями (см. ниже *puc. 10*), оконтурив таким способом область, соответствующую зоне воздействия источника выбросов. Классификация пикселей растра NDVI MODIS на основе значений индекса в особых точках модели позволила визуализировать ареалы предполагаемого одинакового загрязнения почв тяжёлыми металлами, оконтурить и ранжировать их по категориям качества (см. ниже *puc. 10*). В пределах этих областей загрязнения определили количественные характеристики распределения NDVI по классам, разграниченным особыми точками, и их устойчивость за период с 2004 по 2019 г. в зависимости от обеспеченности доступными данными по NDVI.

Оценку степени сходства факторов, определяемых рельефом, для опорных точек на территории проводили по материалам радарной съёмки GMTED2010 (англ. Global Multiresolution Terrain. Elevation Data 2010, https://www.usgs.gov) с использованием геоинформационной системы QGIS 3.16 (https://qgis.org). Анализ растровых карт NDVI по данным MODIS (интерполированные семидневные) с сервера Bera-Science (Лупян и др., 2019) и подготовку картографических материалов проводили в QGIS 3.16 (https://qgis.org).

Результаты и обсуждение

Результаты анализа особенностей рельефа по материалам радарной съёмки (см. рис. 4-6) свидетельствуют, что все пробные площадки располагаются на склоновых землях или на плоских равнинных территориях разной экспозиции с крутизной склонов менее 5° в транзитных (по линиям поверхностного стока) местоположениях, что позволяет в первом приближении пренебречь этими различиями и объединить эти площадки в одну категорию по инсоляции и гидрологии. Различия между пробными площадками в их высотных отметках (см. рис. 4) также оказались пренебрежимо малыми по их потенциальному вкладу в различие температур за счёт различий в высоте над уровнем моря: максимальная разница абсолютных высот между площадками достигает 212 м, что обеспечивает пренебрежимо малую (порядка 1,4°) максимальную разницу в температурах вследствие перепада высот. Всё это, а также сведения о генетической принадлежности и химических свойствах почв пробных площадок позволяет в качестве первого приближения принять, что почвенные и температурно-влажностные условия пробных площадок по их способности поддерживать растительные сообщества для каждого сезона одинаковы. В таком случае очевидные различия между почвами опорных точек в закономерностях внутрисезонной NDVI можно отнести на счёт различий в степени загрязнения почв, а межгодовые различия во внутрисезонной динамике для каждой опорной точки — на счёт различий в погодных условиях.

Макрокинетические характеристики межгодовой и внутрисезонной динамики NDVI

Решение модели (2), полученное в предположении постоянства начальных концентраций компонентов субстрата (тяжёлых металлов, рассматриваемых в качестве стрессора), которые в этом случае учитываются константами модели, адекватно экспериментальным данным по внутрисезонной динамике вегетационного индекса на всех пробных площадках (см. *табл. 2*). Это позволило вычислить коэффициенты модели, а также решением уравнения первой производной от вегетационного индекса по времени определить время достижения вегетационным индексом NDVI своего сезонного максимума t_4 , которое имеет определяющее влияние в установлении пороговой концентрации тяжёлых металлов в почве (Глазунов и др., 2019).

Константы k и B модели уравнения (2) и значения t_4 (см. *табл. 2*) характеризуются слабой межгодовой изменчивостью, которая выявляется в результате их сопоставления по пунктам наблюдения в период с 2004 по 2019 г. Константа интегрирования λ , имеющая смысл

коэффициента, масштабирующего величину *q*, достигает высоких порядков величин, а также характеризуется значительной межгодовой изменчивостью. Тем не менее высокая точность модели подтверждается значениями коэффициента детерминации, близкими к 1.

Закономерности пространственного распределения значений NDVI в зоне воздействия комбината

Результирующая концентрация трёх тяжёлых металлов, соответствующая точке максимума на кривой отклика растительного покрова в форме NDVI на концентрацию тяжёлых металлов (см. *рис.* 7, *табл.* 3), принята за пороговую, так как и увеличение, и уменьшение концентрации тяжёлых металлов в окрестностях этой точки сопровождаются снижением и расчётных, и наблюдённых значений NDVI.

Ранжирование концентраций тяжёлых металлов и значений NDVI

Оптимальная концентрация z, соответствующая максимуму отклика растительного покрова в форме NDVI на воздействие тяжёлых металлов, равна 57,9 мг/кг (см. *табл. 3*). Убывание NDVI в области значений менее оптимальной концентрации, согласно модели, должно сопровождаться уменьшением отклика растительности в форме NDVI, что и нашло своё подтверждение в результатах наблюдений, соответственно которым NDVI при z = 28,5 существенно меньше, чем при z = 57,9. Подтверждаемое опытными данными явление закономерного уменьшения NDVI в результате увеличения концентрации тяжёлых металлов в почве сверх найденной оптимальной и перекрытие опытными точками промежутка с особыми точками модели служат обоснованием возможности проведения и ранжирования откликов на воздействие тяжёлых металлов и нормирования их содержания в почве лишь по значениям NDVI. В то же время в этом случае экспериментальных данных явно недостаточно для обоснования нормирования в области малых концентраций, не превышающих пороговое значение NDVI.

Эмпирическая зависимость концентрации тяжёлых металлов в почве от расстояния до источника загрязнения

Для обеспечения возможности экстраполяции пороговых значений z, соответствующих особым точкам модели, на оси, направленные вдоль основных румбов от источника загрязнения, сначала по данным *табл.* 1 исследовали эмпирическую связь (*рис.* 8 и 9) между концентрацией тяжёлых металлов z в почве и удалённостью от источника загрязнения на северо-восток.





Рис. 8. Удалённость точек с заданной степенью загрязнения почвы от источника загрязнения в направлении на северо-восток *Рис. 9.* Связь между фактической удалённостью точек и удалённостью, рассчитанной по модели

Румбы	Доли ветров	Перенос в направлении:	z_1	<i>z</i> ₂	z_3	z_4	z_5	z_6
Ю	0,07	С	835	275	131	33	12	7
Ю-3	0,016	C-B	577	190	90	23	9	5
3	0,165	В	1034	341	162	41	15	8
C-3	0,284	Ю-В	1184	391	185	47	18	9
С	0,096	Ю	903	298	141	36	13	7
C-B	0,047	Ю-3	755	249	118	30	11	6
В	0,15	3	1010	333	158	40	15	8
Ю-В	0,172	C-3	1045	345	163	42	16	8

Таблица 4. Экстраполированные на направления вдоль основных румбов местоположения на местности точек с концентрациями тяжёлых металлов *z*, соответствующих особым точкам модели (км)

Оказалось, что удалённость NDVI от источника загрязнения связана с концентрацией в почве тяжёлых металлов NDVI эмпирической зависимостью: $R = 58381x^{-1,9}$, что позволило вычислить удалённость на местности значений NDVI для особых точек в направлении на северо-восток от источника (см. *табл. 3*) и, опираясь на представление о единстве законов переноса загрязняющих веществ ветром (Гендугов, Глазунов, 2014), экстраполировать расстояния NDVI с опорного, северо-восточного, направления на остальные румбы, полагая, что коэффициент пересчёта равен корню четвёртой степени из отношения доли ветров нужного румба к доле ветров опорного румба (*табл. 4*).

Экстраполяция местоположения пункта с концентрацией, соответствующей особой точке NDVI (см. *табл. 4*), с опорного румба на остальные семь румбов позволила оконтурить расчётный ареал зоны воздействия комбината путём соединения прямыми линиями местоположений соответственных особых точек, взятых на восьми румбах (см. *рис. 7*). На основе значений вегетационного индекса (q_4 , q_5 , q_6), соответствующих особым точкам опорного северо-восточного румба (NDVI), классифицировали значения пикселей на карте NDVI по трём диапазонам значений индекса: 1) 0 < $q \le 0.59$; 2) 0.59 < $q \le 0.72$; 3) 0.72 < $q \le 0.83$.



Рис. 10. Зонирование территории в окрестностях металлургического комбината по материалам 2004 г.

Зонирование территории в окрестностях металлургического комбината

Состояние территории (*рис. 10*, см. с. 160), расположенной между границами, ассоциированными с особой точкой z_6 , удалённой на 5 км на северо-восток, и зоной, ассоциированной с особой точкой z_5 , удалённой на 9 км, соответствует «чрезвычайной экологической ситуации» (Критерии..., 1992). В пределах границы, ассоциированной с z_6 , удалённой на северовосток на 5 км, почвенный и растительный покровы характеризуются крайней степенью деградации и согласно методическим рекомендациям (Критерии..., 1992) подпадают под определение категории «экологическое бедствие».

Анализ макроскопической кинетики (Гендугов, Глазунов, 2014) отклика NDVI на концентрации тяжёлых металлов по материалам для опорных точек (см. *табл. 3, 4*), расположенных вдоль опорного направления от Норильска на северо-восток, показал, что техногенное воздействие в этом направлении проявляется на протяжении 23 км. В соответствии с работой (Критерии..., 1992), состояние почвенного и растительного покровов территории, расположенной между границами, ассоциированными с z_5 , удалённой на северо-восток от Норильска на 9 км, и z_4 , удалённой на 23 км, соответствует «удовлетворительной экологической ситуации». Полученные результаты согласуются с данными работы (Корец и др., 2006).

Анализ гистограмм распределения величин NDVI в пределах ареалов, выделенных на территории, находящейся под воздействием выбросов с предприятия

Анализ гистограмм призван выяснить, насколько истинные частоты встречаемости значений NDVI соответствуют эмпирическим границам, ассоциированным с особыми точками модели (см. *табл. 3*). Характер распределения истинных значений NDVI для всех трёх зон экологического состояния территории (*puc. 11*) исключительно полно поддерживает использованную теорию зонирования на основе анализа дозовой зависимости, что подтверждается наличием в распределении значений NDVI пика в области значений, соответствующих пороговым величинам (см. *табл. 3*), рассчитанным по модели (3).





Таким образом, зоны можно выявить и оконтурить, ограничившись лишь анализом NDVI, опираясь на полученную для него пороговую величину. Эти результаты свидетельствуют, что использование установленных верхних граничных значений позволит получить весьма точную карту дискретных зон экологического состояния территории.

Оценка устойчивости выявленных закономерностей во времени

Результаты оценки экологического состояния земель в окрестностях металлургического комбината, проведённой для периода с 2005 по 2019 г. (*рис. 12*) на основе подспутниковых измерений в опорных точках 2004 г. (Яковлев и др., 2008), показали, что выявленные закономерности обладают определённой устойчивостью во времени, тем самым доказывая, что экологическую оценку состояния почв в окрестностях источника выброса в атмосферу тяжёлых металлов можно проводить на основе анализа данных ДЗЗ в форме NDVI, предварительно установив на основе подспутниковых измерений в опорных точках территории параметры теоретической зависимости вида «доза – ответ» для одинаковых почв при прочих равных условиях с использованием разработанной теоретической модели.



Рис. 12. Зонирование территории в окрестностях металлургического комбината по материалам 2005–2019 гг.

Заключение

Решение теоретической модели, полученное в предположении постоянства начальных концентраций тяжёлых металлов, рассматриваемых в качестве стрессора, адекватно экспериментальным данным по внутрисезонной динамике вегетационного индекса на всех пробных площадках, причём параметры k и B модели и время достижения максимума вегетации характеризуются слабой межгодовой изменчивостью, выявленной в результате их сопоставления по пунктам наблюдения в период с 2004 по 2019 г. На основе теоретической модели отклика живого в форме NDVI на воздействие комплекса тяжёлых металлов получены пороговые результирующие концентрации тяжёлых металлов в почвах. Это открыло возможность построения карты экологического состояния земель по материалам 2004 г. Устойчивость выявленных закономерностей во времени доказывает, что экологическую оценку состояния почв в окрестностях источника выброса в атмосферу тяжёлых металлов можно проводить на основе анализа данных ДДЗ в форме NDVI, предварительно установив на основе подспутниковых измерений в опорных точках территории параметры теоретической зависимости вида «доза – ответ» для одинаковых почв при прочих равных условиях с использованием разработанной теоретической модели.

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: 121040800147-0).

Литература

- 1. Гендугов В. М., Глазунов Г. П. Ветровая эрозия почвы и запыление воздуха. М.: Физматлит, 2007. 240 с.
- 2. *Гендугов В. М., Глазунов Г. П.* Макрокинетическая модель микробного роста на многокомпонентном субстрате // Вестн. Московского ун-та. Сер. 17. «Почвоведение». 2014. № 3. С. 10–16.
- 3. *Гендугов В. М., Глазунов Г. П., Евдокимова М. В.* Макрокинетика роста и отмирания микробов в почве // Микробиология. 2011. Т. 80. № 4. С. 508–512. DOI: 10.1134/S0026261711040059.
- 4. Глазунов Г. П., Гендугов В. М., Евдокимова М. В., Титарев Р. П., Шестакова М. В. Макроскопическая кинетика временной и пространственной изменчивости вегетационного индекса NDVI на территории заповедника «Ямская степь» в условиях загрязнения почвы тяжёлыми металлами // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 111–127. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-111-127.
- 5. *Колесников С. И., Пономарёва С. В., Казеев К. Ш., Вальков В. Ф.* Влияние загрязнения Ba, Mn, Sb, Sn, Sr, V, W на фитотоксичность чернозема // Агрохимия. 2009. № 8. С. 49–53.
- 6. *Корец М. А., Рыжкова В. А., Барталев С. А.* Оценка состояния растительного покрова в зоне воздействия промышленных предприятий с использованием данных ENVISAT MERIS и SPOT Vegetation // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Вып. 3. Т. 2. С. 330–334.
- Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашницкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. 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. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- 8. Методика «Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия» / Минприроды России. 1992.
- 9. Плеханова И. О., Золотарева А. О. Оценка и нормирование экологического состояния почв, загрязненных тяжелыми металлами // Агрохимия. 2021. № 7. С. 83–94.
- 10. *Титов А. Ф., Казнина Н. М., Таланова В. В.* Тяжёлые металлы и растения. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2014. 194 с.
- 11. Яковлев А.С., Плеханова И.О., Кудряшов С.В., Аймалетдинов Р.А. Оценка и нормирование экологического состояния почв в зоне деятельности предприятий металлургической компании «Норильский никель» // Почвоведение. 2008. № 6. С. 737–750. DOI: https://doi.org/10.1134/ S1064229308060100.
- 12. Guidelines for Ecological Risk Assessment. U.S. Environmental Protection Agency, 1998. 188 p. Federal Register 63(93):26846-26924.
- Hardy A., Benford D., Halldorsson T., Jeger M.J., Knutsen K. H., More S., Mortensen A., Naegeli H., Noteborn H., Ockleford C., Ricci A., Rychen G., Silano V., Solecki R., Turck D., Aerts M., Bodin L., Davis A., Edler L., Gundert-Remy U., Sand S., Slob W., Bottex B., Abrahantes J. C., Marques D. C., Kass G., Schlatter J. R. Update: use of the benchmark dose approach in risk assessment // EFSA J. 2017. V. 15(1). Art. No. 4658. 41 p. DOI: 10.2903/j.efsa. 2017.4658.
- 14. Using 21st Century Science to Improve Risk-Related Evaluations. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington, DC: The National Academies Press, 2017. 200 p. DOI: 10.17226/24635.

Ecological assessment of lands contaminated by a complex of heavy metals in the vicinity of Norilsk for the period from 2004 to 2019 based on NDVI MODIS materials from the Vega-Science server

M.V. Evdokimova, G. P. Glazunov, A. S. Yakovlev, I. O. Plekhanova, R. A. Aimaletdinov, M. V. Shestakova

Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia E-mail: mawkae@gmail.com

The article analyzes the regularities of spatial and temporal (interannual and intra-seasonal) variability of the vegetation index NDVI in the vicinity of the source of heavy metals entering the environment in connection with their concentrations in soils. The aim of the study was to provide a scientific justification for the possibility of an objective quantitative assessment of the ecological state of lands contaminated with the complex of heavy metals based on remote sensing data based on a theoretical model of the response of living beings in the form of NDVI to the effects of stressors in the form of the complex of heavy metals with its preliminary parameterization based on subsatellite measurements. It is established that the intra-seasonal dynamics of NDVI and the response of the ecosystem in the form of NDVI to the content of heavy metals in soils in the vicinity of Norilsk, which are affected by metal-lurgical production, are satisfactorily described by the theoretical model. It is possible to generalize the results of satellite (NDVI) and subsatellite (the concentration of heavy metals in the soil) observations to obtain an assessment of the ecological state of the land for the purposes of justifying measures to restore their quality and developing regional standards for soil quality.

Keywords: ecological state, bioindication, mathematical modeling, analysis of Earth remote sensing data, vegetation index, risk assessment, natural background

Accepted: 24.07.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-149-165

References

- 1. Gendugov V. M., Glazunov G. P., *Vetrovaya eroziya pochvy i zapylenie vozdukha* (Wind erosion of the soil and dusting of the air), Moscow: Fizmatlit, 2007, 240 p. (in Russian).
- 2. Gendugov V. M., Glazunov G. P., Macrokinetic model of microbial growth on a multicomponent substrate, *Moscow University Soil Science Bull.*, 2014, Vol. 69, pp. 99–105, DOI: 10.3103/S0147687414030028.
- 3. Gendugov V.M., Glazunov G.P., Evdokimova M.V., Macrokinetics of microbial growth and decline in soil, *Microbiology*, 2011, Vol. 80, No. 4, pp. 514–518, DOI: 10.1134/S0026261711040059.
- 4. Glazunov G. P., Gendugov V. M., Evdokimova M. V., Titarev R. P., Shestakova M. V., The macroscopic kinetics of temporal and spatial variability of the NDVI in Yamskaya Steppe Reserve under conditions of soil contamination with heavy metals, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 111–127 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-111-127.
- 5. Kolesnikov S. I., Ponomareva S. V., Kazeev K. Sh., Val'kov V. F., Effect of Contamination with Heavy Metals (Ba, Mn, Sb, Sn, Sr, V, and W) on the Phytotoxiciti of Chernozem, *Agrokhimiya*, 2009, No. 8, pp. 49–53 (in Russian).
- 6. Korets M.A., Ryzhkova V.A., Bartalev S.A., Assessment of the state of vegetation cover in the zone of impact of industrial enterprises using data from ENVISAT MERIS and SPOT Vegetation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, Vol. 2, No. 3, pp. 330–334 (in Russian).
- Loupian E.A., Proshin A.A., Bourtsev M.A., Kashnitskii A.V., Balashov I.V., Bartalev S.A., Konstantinova A.M., Kobets D.A., Mazurov A.A., Marchenkov V.V., Matveev A.M., Radchenko M.V., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A., Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- 8. *Metodika "Kriterii otsenki ekologicheskoi obstanovki territorii dlya vyyavleniya zon chrezvychainoi ekologicheskoi situatsii i zon ekologicheskogo bedstviya"* (Methodology "Criteria for assessing the environmental situation of territories for identifying zones of an environmental emergency and zones of environmental disaster"), Minprirody Rossii, 1992.

- 9. Plekhanova I. O., Zolotareva A. O., Assessment and regulation of the ecological state of soils contaminated with heavy metals, *Agrokhimiya*, 2021, No. 7, pp. 83–94 (in Russian).
- 10. Titov A. F., Kaznina N. M., Talanova V. V., *Tyazhelye metally i rasteniya* (Heavy metals and plants), Petrozavodsk: Karel'skii NTs RAN, 2014, 194 p. (in Russian).
- Yakovlev A. S., Plekhanova I. O., Kudryashov S. V., Aimaletdinov R. A., Assessment and regulation of the ecological state of soils in the impact zone of mining and metallurgical enterprises of Norilsk Nickel Company, *Eurasian Soil Science*, 2008, Vol. 41, No. 6, pp. 648–659, DOI: https://doi.org/10.1134/ S1064229308060100.
- 12. *Guidelines for Ecological Risk Assessment*, U.S. Environmental Protection Agency, 1998, 188 p., Federal Register 63(93):26846–26924.
- Hardy A., Benford D., Halldorsson T., Jeger M.J., Knutsen K. H., More S., Mortensen A., Naegeli H., Noteborn H., Ockleford C., Ricci A., Rychen G., Silano V., Solecki R., Turck D., Aerts M., Bodin L., Davis A., Edler L., Gundert-Remy U., Sand S., Slob W., Bottex B., Abrahantes J.C., Marques D.C., Kass G., Schlatter J. R., Update: use of the benchmark dose approach in risk assessment, *EFSA J.*, 2017, Vol. 15(1), Art. No. 4658, 41 p., DOI: 10.2903/j.efsa. 2017.4658.
- 14. Using 21st Century Science to Improve Risk-Related Evaluations, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Washington, DC: The National Academies Press, 2017, 200 p., DOI: 10.17226/24635.